

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа    Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 03.03.02 «Физика»  
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

| Тема работы   |
|---|
| Влияние энергии и времени облучения ускоренными электронами на выход водорода из титана ВТ1-0 |

УДК 669.295:669.788:539.124

Студент

| Группа | ФИО    | Подпись | Дата |
|--------|--------|---------|------|
| 150Б42 | Ян Хан |         |      |

Руководитель

| Должность                 | ФИО           | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| Ассистент ОЭФ ИЯТШ<br>ТПУ | Сыпченко В.С. | к.ф.-м.-н.                |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность      | ФИО              | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|----------------|------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ШИП ТПУ | Черепанова Н. В. | к.ф.н.                    |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность         | ФИО             | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-------------------|-----------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент ОКД<br>ТПУ | Ларионова Е. В. | к.х.н                     |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Руководитель ООП             | ФИО        | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|------------------------------|------------|---------------------------|---------|------|
| Руководитель ОЭФ<br>ИЯТШ ТПУ | Лидер А.М. | д.т.н.                    |         |      |

Томск – 2018 г.

## Запланированные результаты обучения по программе

| Код результата                          | Результат обучения<br>(выпускник способен)  | Требования<br>ФГОС,<br>критериев и/или<br>заинтересованных<br>сторон |
|---|---|--|
| <i>Общекультурные компетенции</i>       |   |  |
| <b>Р1</b>                               | Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности   | Требования<br>ФГОСЗ+<br>(ОК-1, ОК-2,<br>ОК-3, ОК-4)                  |
| <b>Р2</b>                               | К самоорганизации и самообразованию, работать в коллективе, к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.   | Требования<br>ФГОСЗ+<br>(ОК-5, ОК-6, ОК-7,<br>ОК-8, ОК-9)            |
| <i>Общепрофессиональные компетенции</i> |   |  |
| <b>Р3</b>                               | Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка. | Требования<br>ФГОСЗ+<br>(ОПК-1, ОПК-2,<br>ОПК-3, ОПК-7)              |
| <b>Р4</b>                               | Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.  | Требования<br>ФГОСЗ+<br>(ОПК-4, ОПК-5,<br>ОПК-6)                     |
| <b>Р5</b>                               | Получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.  | Требования<br>ФГОСЗ+<br>(ОПК-8, ОПК-9)                               |
| <i>Профессиональные компетенции</i>     |   |  |
| <b>Р6</b>                               | <u>Научно-исследовательская деятельность</u><br>Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, физики плазмы с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.                                | Требования<br>ФГОСЗ+<br>(ПК-1, ПК-2)                                 |
| <b>Р7</b>                               | <u>Научно-инновационная деятельность</u>  | Требования   |

|           |   |  |
|-----------|---|--|
|           | Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения в результате освоения профильных дисциплин для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.                            | ФГОС3+<br>(ПК-3, ПК-4, ПК-5)               |
| <b>Р8</b> | <u>Организационно-управленческая</u><br>Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования   | Требования<br>ФГОС3+<br>(ПК-6, ПК-7, ПК-8) |
| <b>Р9</b> | <u>Педагогически-просветительская</u><br>Проектировать, организовывать, анализировать педагогическую деятельность, владеть последовательностью изложения материала с использованием междисциплинарных связей физики с другими дисциплинами, участвовать в информационно-образовательных мероприятиях по пропаганде и распространению научных знаний | Требования<br>ФГОС3+<br>(ПК-9)             |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 03.03.02 «Физика»  
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_ Лидер А.М.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|                            |
|----------------------------|
| <b>бакалаврской работы</b> |
|----------------------------|

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО    |
|--------|--------|
| 150Б42 | Ян Хан |

Тема работы:

|  |                      |
|--|----------------------|
| <b>Влияние энергии и времени облучения ускоренными электронами на выход<br/>водорода из титана ВТ1-0</b> |                      |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)  | 02.02.2018 г., 618/с |

|  |  |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: |  |
|--|--|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|  |  |
|--|--|
| <b>Исходные данные к работе</b><br><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i> | Титан марки ВТ1-0; установка для насыщения водородом; установка для исследования термо- и радиационно-стимулированного газовыделения; анализатор водорода RHEN602. |
|--|--|

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b><br/> (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p> | <p>Содержание текстового документа<br/> – проникновение и состояние водорода в металлах.<br/> – методы насыщения образцов водородом;<br/> – определение содержания водорода<br/> – результаты и обсуждение.<br/> Перечень подлежащих разработке вопросов:<br/> 1. Провести газовыделение при разных условиях;<br/> 2. Обсудить механизмы газовыделения при разных условиях;<br/> 3 Исследовать выхода водорода из образцов титана методом РСГВ И ТСГВ в зависимости от разных условий.</p> |
| <p><b>Перечень графического материала</b><br/> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>   | <p>1 Схема экспериментальной установки для насыщения образцов водородом.<br/> 2 Схема установки для исследования термо- и радиационно- стимулированного газовыделения.<br/> 3 Схема анализатор водорода RHEN-602</p>   |
| <p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b><br/> (с указанием разделов)</p>  |  |
| <p><b>Раздел</b></p>  | <p><b>Консультант</b></p>  |
| <p>Социальная ответственность</p>   | <p>Ларионова Е. В.</p>   |
| <p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>  | <p>Черепанова Н. В.</p>  |
| <p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>  |  |
|   |  |

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p> |  |
|--|--|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность                         | ФИО                  | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------------------------|----------------------|------------------------|---------|------|
| <p>Ассистент ОЭФ ИЯТШ<br/>ТПУ</p> | <p>В.С. Сыпченко</p> | <p>к.ф.-м.н.</p>       |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа        | ФИО           | Подпись | Дата |
|---------------|---------------|---------|------|
| <p>150Б42</p> | <p>Ян Хан</p> |         |      |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

|               |            |
|---------------|------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b> |
| 150Б42        | Ян Хан     |

|                            |             |                                  |                                 |
|----------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------------------|
| <b>Школа</b>               | <b>ИЯТШ</b> | <b>Отделение</b>                 | <b>Экспериментальной физики</b> |
| <b>Уровень образования</b> | Бакалавриат | <b>Направление/специальность</b> | Физика                          |

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

|   |  |
|---|--|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических; энергетических; финансовых; информационных; человеческих;<br>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов;<br>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования. | Финансовые ресурсы 75000 руб.;<br>Человеческие ресурсы 2 чел.; |
|---|--|

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

|   |   |
|---|---|
| 1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения<br>2. Планирование научно-исследовательских работ<br>3. Составление бюджета внедрения инженерного | 1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала прибор контроля металла термоэлектрическим методом.<br>2. Планирование процесса управления прибор контроля металла термоэлектрическим методом: структура и график проведения<br>3. Расчет бюджет работа |
|---|---|

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

|  |
|--|
| 1. Карта сегментирования рынка<br>2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений<br>3. Оценочная карта для технологией QuaD<br>4. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей<br>5. Календарный план-график |
|--|

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал консультант:**

|                  |                  |                               |                |             |
|------------------|------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b> | <b>ФИО</b>       | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Доцент ШИП ТПУ   | Черепанова Н. В. | к.ф.н.                        |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |            |                |             |
|---------------|------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 150Б42        | Ян Хан     |                |             |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

|               |            |
|---------------|------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b> |
| 150Б42        | Ян Хан     |

|                            |             |                                  |                                 |
|----------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------------------|
| <b>Школа</b>               | <b>ИЯТШ</b> | <b>Отделение</b>                 | <b>Экспериментальной физики</b> |
| <b>Уровень образования</b> | Бакалавриат | <b>Направление/специальность</b> | Физика                          |

| <b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>  |  |
|---|--|
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения  | Объектом исследования является технически чистый титан марки BT1-0<br>Область применения: охрупчивание                                     |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:  |  |
| <b>1. Производственная безопасность</b><br>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты)</li> </ul> | Отклонение показателей микроклимата на рабочем месте;<br>Электромагнитное излучение<br>Шум<br>Электробезопасность<br>Пожар взрывоопасность |
| <b>2. Экологическая безопасность:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>   | Требование экологической безопасности при проектировании, разработке, эксплуатации, техническом обслуживании электрооборудование           |
| <b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> </ul>   | Правила пожарной безопасности при разработке и эксплуатации электрооборудования  |

|   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>  |  |
| <b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul> | Нормы рабочего времени при работе за ПК<br>Организация рабочей зоны при работе за ПК |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал консультант:**

| Должность      | ФИО             | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|----------------|-----------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОКД ТПУ | Ларионова Е. В. | К.Х.Н                  |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО    | Подпись | Дата |
|--------|--------|---------|------|
| 150Б42 | Ян Хан |         |      |



**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Уровень образования бакалавриат

Направление подготовки 03.03.02 «Физика»

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

Период выполнения \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)                | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|--|------------------------------------|
| 01.03.2017    | Аналитический обзор литературы                                       | 15                                 |
| 01.09.2017    | Исследование влияния времени облучения на выход водорода             | 15                                 |
| 30.12.2017    | Исследование влияния энергии ускоренных электронов на выход водорода | 20                                 |
| 30.04.2018    | Анализ результатов   | 15                                 |
| 25.05.2018    | Социальная ответственность   | 15                                 |
| 25.05.2018    | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение      | 15                                 |
| 25.05.2018    | Заключение   | 5                                  |

Составил преподаватель:

| Должность              | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------------|---------------|------------------------|---------|------|
| Ассистент ОЭФ ИЯТШ ТПУ | В.С. Сыпченко | к.ф.-м.н.              |         |      |

**СОГЛАСОВАНО:**

| Руководитель ООП | ФИО        | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|------------|------------------------|---------|------|
| Руководитель ОЭФ | Лидер А.М. | д.т.н.                 |         |      |

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 88 с., 38 рис., 10 табл., 40 источников, 0 прил.

Ключевые слова: водород, титан, радиационное газовыделение, термостимулированное газовыделение, энергия активации десорбции.

Объектом исследования является технически чистый титан BT1-0 образцы размером  $10 \times 7$  мм

Цель работы – получение закономерностей выхода водорода из титана марки BT1-0 под воздействием ускоренных электронов разных энергий и времени облучения.

В процессе исследования проводились: подготовка образцов; эксперименты по радиационному и термостимулированному газовыделению расчеты энергии активации десорбции.

В результате исследования выявлено, что на десорбцию водорода из титана BT1-0, при облучении ускоренными электронами, влияет как время, так и энергия ускоренных электронов; чем больше время и выше энергия облучения ускоренными электронами, тем меньше остаточное содержание водорода в титана BT1-0.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: Режимы насыщения водородом: 1 М раствор  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , плотность ток насыщения  $j=0.48 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$ , время насыщения  $t=120\text{мин}$ ; Режимы облучения: энергия ускоренных электронов  $E_e = 25\text{-}40 \text{ кэВ}$ , время облучения ускоренными электронами  $t_{об} = 15\text{-}60 \text{ мин}$ , плотность тока пучка ускоренных электронов  $j_{об} = 0.25\text{мкА}\cdot\text{мм}^{-2}$ , температура образца до облучения ускоренными электронами  $T_{обр} \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$

Степень внедрения: результаты работы представлены на международной научной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук».

Область применения: водородная энергетики и защита металлов от водородного охрупчивания.

Экономическая эффективность/значимость работы найти лучший способ предотвратить водородное охрупчивание, увеличение срока службы металлических изделий работающих в средах с повышенным содержанием водорода

В будущем планируется определить структуру металл–водорода в образцах после насыщения, зависимость концентрации водорода от глубины образца.

## Определения, обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Насыщение водородом электролитическим методом – наводороживание образцов с помощью электрического напряжений.

Энергия активации десорбции ( $E_d$ ) – энергия, которую атом или молекула адсорбата получает, чтобы преодолеть барьер потенциальной (энергию) ямы и покинуть поверхность.

ТСГВ – термостимулированное газовыделение. Метод анализа состава газовых примесей в твердых образцах под действием ускоренных электронов с помощью масс-спектрометра.

РСГВ – радиационное стимулированное газовыделение. Метод анализа состава газовых примесей в твердых образцах при линейном нагреве с помощью масс-спектрометра.

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 16 |
| 1      Взаимодействие водорода с конструкционными материалами .....                                    | 18 |
| 1.1 Физические принципы растворения водорода в металлах .....  | 18 |
| 1.2 Структура титан-водород и растворение водорода в титане.....                                       | 19 |
| 1.3 Термическая десорбция .....  | 21 |
| 1.4 Энергия активации выхода водорода при линейном нагреве<br>образца.....                             | 23 |
| 1.5 Накопление водорода в титане и извлечение водорода при<br>термодесорбции .....                     | 24 |
| 1.5.1 Накопление водорода в деформированных титане и<br>извлечение водорода при термодесорбции .....   | 29 |
| 1.6 Радиационно-стимулированная диффузия газов в металлах .....  | 30 |
| 1.6.1 Механизм диффузии водорода в металлах .....  | 30 |
| 1.6.2 Модель диффузии водорода в металлах под действием<br>ускоренных электронов .....                 | 33 |
| 1.6.3 Основные механизмы радиационно-стимулированной<br>десорбции газов .....                          | 35 |
| 1.6.4 Радиационно-стимулированный выход водорода при разных<br>энергиях электронов.....                | 38 |
| 1.7 Глубина проникновения электронов.....  | 39 |
| Вывод.....   | 40 |
| 2 Объект и методы исследования. ....   | 41 |
| 2.1 Материал исследований .....  | 41 |
| 2.2 Насыщение водородом электролитическим методом .....  | 41 |
| 2.3 Определение содержания водорода с помощью анализатора<br>водорода RHEN602 фирмы LECO .....         | 42 |
| 2.4 Установка для исследования процесса термо- и<br>радиационно-стимулированного выхода водорода ..... | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Вывод.....  | 47 |
| 3 Результаты проведенного исследования.....   | 49 |
| 3.1 Влияние времени облучения на выход водорода .....   | 49 |
| 3.2 Влияние энергии ускоренных электронов на выход водорода .....                             | 50 |
| 3.3 Массовое содержание водорода в Ti VT1-0 после облучения<br>ускоренными электронами .....  | 51 |
| 3.4 Термостимулированное газовыделение.....   | 54 |
| 3.5 Расчет энергии активации десорбции .....  | 56 |
| Вывод.....  | 58 |
| 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсоснабжение                             | 59 |
| 4.1 Планирование управления научно-техническим проектом.....                                  | 59 |
| 4.2 Бюджет научного исследования .....  | 61 |
| 4.2.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты .....                                | 61 |
| 4.2.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных<br>(экспериментальных) работ..... | 63 |
| 4.2.3 Расчет затрат на специальное оборудование для научных<br>(экспериментальных) работ..... | 68 |
| 4.2.4 Основная заработная плата .....   | 68 |
| 4.2.5 Дополнительная заработная плата .....   | 69 |
| 4.2.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые<br>отчисления) .....                        | 70 |
| 4.2.7 Накладные расходы.....  | 70 |
| 4.2.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского<br>проекта.....                   | 70 |
| 5. Социальная ответственность.....  | 72 |
| 5.1 Производственная безопасность .....   | 72 |
| 5.1.1 Отклонение показателей микроклимата на рабочем месте ...                                | 73 |
| 5.1.2 Электромагнитное излучение .....  | 74 |

|  |    |
|--|----|
| 5.1.3 Шум.....   | 74 |
| 5.1.4 Электробезопасность .....                                | 75 |
| 5.1.5 Пожар взрывоопасность .....                              | 78 |
| 5.2 Организационные мероприятия обеспечения безопасности ..... | 79 |
| 5.3 Охрана окружающей среды .....                              | 79 |
| 5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....                 | 80 |
| 5.5 Перечень законодательного документа .....                  | 81 |
| Вывод.....   | 82 |
| Заключение .....   | 84 |
| Список литературы .....  | 85 |

## Введение

Как известно, проникновение водорода в металлах приводит к изменению свойства металла. В производстве материалов, а именно, плавки, механической обработки, термообработки, травлении, неизбежен процесс проникновения водорода в изделие. Проникновение и накопление водорода, как правило, приводит к серьезному ухудшению механических свойств материала (водородное хрупчивание). Со времен выхода в свет работы появилось большое количество исследований посвящённых данной проблеме, выделенных в качестве основополагающих в предисловии редактора перевода [1]. В современное время такие проблемы имеют практическое значение. Их исследуют в разных научных направлениях, поскольку удастся достичь частичной, а иногда и полной перестройки металлов, а так же их сплавов на различных уровнях их строения [2].

Для извлечения водорода из конструкционных материалов за последние десятилетия было разработано несколько методов, одними из них является: термические, радиационное, химические и многие др. При термическом воздействии, температуры от 200 °С и до нескольких сотен градусов, происходит не только удаление водорода из материала, но и отжиг дефект, как правило сопровождающийся ростом кристаллического зерна. В случае же химического воздействия происходит удаление водорода с образованием сложных соединений на поверхности материала, в результате этого необходима дополнительная очистка поверхности. При радиационном воздействии (заряженные частицы) высоких энергий (от сотен кэВ и выше) процесс сопровождается перераспределением водорода и «выбиванием» водорода из материала, а при высоких плотностях падающего пучка заряженных частиц может наблюдаться оплавление поверхности. В случае же низких энергий (от сотен эВ и до десятков кэВ) может наблюдаться распыление поверхности.

При радиационном воздействии выход водорода из конструкционных материалов является не разрушающим методом. Целью настоящей работы являлось: получение закономерностей выхода водорода из титана марки ВТ1-0



в зависимости от энергий ускоренных электронов (25-40 кэВ) и времени облучения (15-60 мин).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Насыщение образцов водородом.
2. Получение спектров термо- и радиационно-стимулированной десорбции водорода из образцов титана ВТ1-0 насыщенных водородом в зависимости от:
  - а) энергии ускоренных электронов (25 - 40 кэВ);
  - б) времени облучения.
3. Определение содержания водорода с помощью анализатора водорода RHEN602 фирмы LECO
4. Обработка и анализ полученных результатов

Научная новизна работы заключается в том, что впервые будут использованы энергии электронов 25-40 эВ, впервые будут установлено влияния времени облучения на процессы выхода водорода под действием ионизирующего излучения.

# **1 Взаимодействие водорода с конструкционными материалами**

## **1.1 Физические принципы растворения водорода в металлах**

Водород, растворяясь в конструкционном материале, вызывает изменение свойства материала. Это изменение имеет как положительное влияние, так и отрицательное. С одной стороны, растворение водорода приводит к охрупчиванию, с другой к увеличению пластичности материалов[3].

При таких технологических процессах как: нанесении покрытий (гальваническим методом), травлении металла в кислотах и при эксплуатации в условиях повышенного давления газообразного водорода и т.п. [4], водород существует в ионизированном состоянии и диффундирует к дефектам металла, заполняя их. В результате это приводит к избыточному давлению и как следствие, плотность металла увеличивается с ростом количества дефектов, что способствует еще большему накоплению водорода. Захваченный водород из-за избыточного внутреннего давления начинает перераспределяться. На количество абсорбированного водорода очень сильно влияет наличие примесей в металле-накопителе.

Начало диффузии водорода в металле начинается с адсорбции водорода в приповерхностной области. В процессе активированной адсорбции молекулы водорода распадается на атомы и дальнейшем диффундируют вглубь металла. Этот процесс облегчает перемещение атомов газа в металле. Диссоциация молекул водорода в металлах определяется активированной адсорбцией, а состояние поверхности определяет скорость диффузии, например, оксидные пленки и иные абсорбированные вещества могут сильно замедлить скоростей диффузии. Другими словами, скорость диффузии не определяется давлением водорода, а зависит от дефектов (пор и трещин), которые находятся в пленке. Процесс объемной диффузии водорода в металлах является основным.

Активные газы отличается повышенной способностью к абсорбции металлами. Однако, водород имеет самые активные свойства для всех металлов. Поэтому все металлы могут абсорбировать водород.

Ионизированный водород обладает различными свойствами. В предельном случае водород образует соединение (гидрид) или остается в виде положительно заряженного иона (образует  $H^+$ ). В первом случае химическое соединение образуется при соединении иона. Щелочные металлы, образуют гидриды  $KH$ ,  $LiH$ , свойственное взаимодействию с водородом. Во втором, случае атомы водородов диссоциируют и остаются протонами, что позволяет ему проникать в решетку без взаимодействия с ней.

Для объяснения влияния водорода вводятся понятия «протонный газ» в системы металл-водород, которые используются для описания некоторых физических свойства металлов, в особенности для их энергетических спектров [5].

## **1.2 Структура титан-водород и растворение водорода в титане**

Титан – элемент побочной четвёртой группы периодической таблицы химических элементов, четвёртого периода, атомный номер – 22. На рисунке 1 представлена фазовая диаграмма титан-водород. Решётка структуры титана является гексагональной плотноупакованной, называемой  $\alpha$ -фазой титана. Когда температура больше, чем  $882\text{ }^{\circ}\text{C}$ , решётка структуры титана является объёмно-центрированной кубической, называемой  $\beta$ -фазой титана. При температуре ниже  $319\text{ }^{\circ}\text{C}$  при добавлении водорода проявляются фаза  $\alpha+\beta$  – состояния (рисунок 1.1). Когда отношение количества водорода и титана составляет 3:2, появляется гранецентрированная кубическая ( $\gamma$ -фаза), с последующим образованием тетрагональной сингонии ( $\delta$ -фаза), отношение количества атома достигнет до 1.85 [6]. Но как только температура превышает  $319^{\circ}\text{C}$ , системы становится сложной –  $\alpha+\beta+\gamma$  фаза.

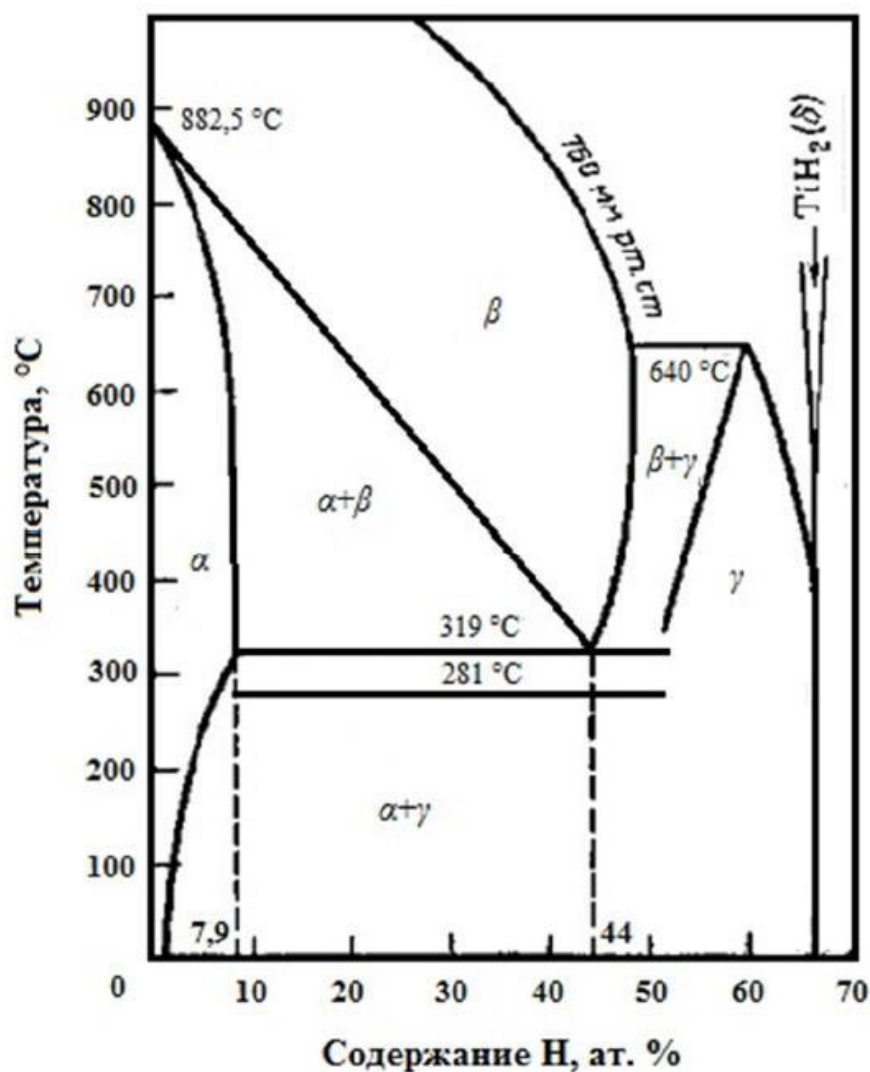


Рисунок 1.1 – Фазовая диаграмма титан-водорода [7]

Так как растворение водорода в железе, никеле являются эндотермическим реакциями, то растворимость крайне низка. Но растворимость в элементах четвёртой побочной группы самая высокая, так как для них характерен экзотермический процесс.

Получено уравнение растворимости водорода (закон Сивертса) [8]:

$$C_H = A \cdot \sqrt{P} \cdot e^{\frac{\Delta E}{R}}$$

где : A-постоянная, P-давление, ΔE-изменение энергии

Как видно, чем больше давление, тем больше растворимость водорода. Таким образом, когда растворение достигает равновесия, содержание водорода будет снижаться. При давлении  $1 \times 10^5$  Па, концентрация водорода составит[9]:

$$C_H = 8.6 \cdot 10^4 \cdot e^{\frac{2520}{T}} = 1.9 \cdot 10^{-6}.$$

Водорода хорошо растворим в титане. Кристаллическая решетка  $\alpha$ -титана имеет два типа пустот: тетрагональные пустоты с радиусом  $0.34\text{\AA}$  и октаэдрические пустоты с радиусом  $0.62\text{\AA}$ . Размер атома водорода составляет  $0.41\text{\AA}$ , поэтому они преимущественно находятся октаэдрических пустотах. В ОЦК решетке ( $\beta$ -фаза) пустоты в титане размером  $0.44\text{\AA}$ , что близко к размеру самого атома водорода, именно поэтому степень растворения водород в  $\beta$ -фазе титана выше чем в других [10].

### 1.3 Термическая десорбция

Нагрев поверхности приводит к увеличению энергии десорбированных частиц. При энергии десорбированных частиц выше, чем энергии связанно с поверхности, частицы происходит газа выделение. Поэтому в соответственном диапазоне температуры, скорость десорбции тоже увеличился при увеличении температуры образец. Совокупность количества десорбированных частиц могут быть обнаружены с помощью обычных масс-спектрометров. Масс-спектрометры позволяют контролировать частоту исследования газов и также продвинутся в область изучения адсорбции смесей газов и регистрировать потоки конденсирующихся веществ или радикалов. Исследуя температурную зависимости скорости десорбции можно получить информацию об энергии связи адсорбата [11].

Скорости десорбции  $r_{\text{des}}$  - количество частицы (атомов или молекул), десорбирующихся с единичной площадки поверхности в единицу времени. Чаще всего эта величина представляется в общей форме [12]:

$$r_{\text{des}} = \sigma^* f^*(\Theta) \exp(-E_{\text{des}}/kT), \quad (3)$$

где  $f^*(\Theta)$  – функция, описывающая зависимость от покрытия;  $\sigma^*$  - стерический коэффициент десорбции;  $E_{\text{des}}$  – энергия активации десорбции;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.

Если адсорбированные атомы или молекулы находятся на идентичных местах в металле и не взаимодействуют друг с другом, то скорость десорбции можно выражаться уравнением Полани-Вигнера[12]:

$$r_{\text{des}} = -d\Theta/dt = k_n \Theta^n = k_n^0 \Theta^n \exp(-E_{\text{des}}/kT), \quad (4)$$

где  $E_{\text{des}}$  – энергия активации десорбции;  $n$  – порядок кинетики десорбции;  $k_n$  – константа скорости десорбции.

Показателя степени  $n$ , в выражении (4) определяется порядок кинетики десорбции. Разность десорбции при различных порядках показано на рисунке 3.

В кинетиках нулевого порядка ( $n = 0$ ) скорость десорбции зависит только от температуры. Если определена температура образца, то и определена скорость десорбции. Кинетика нулевого порядка наблюдается в случае квазиравновесного сосуществования разреженного двумерного газа адатомов и доменов двумерной твердой фазы. При десорбции из однородной многослойной пленки этот метод тоже подходит. При кинетике первого порядка ( $n = 1$ ) скорость десорбции пропорциональна  $\Theta$ . Это соответствует наиболее простому случаю, когда отдельные атомы десорбируются прямо и независимо из своих адсорбционных мест. Константа скорости кинетики первого порядка  $k_1^0$  имеет размерность частоты ( $\text{с}^{-1}$ ). При кинетике второго порядка ( $n = 2$ ) скорость десорбции пропорциональна  $\Theta^2$ . Это случай ассоциированной молекулярной десорбции, когда десорбирующаяся молекула образуется из двух радикалов, занимающих изначально отдельные адсорбционные места.

Следует отметить, что в реальности сложные кинетики могут приводить к различным порядкам десорбции, включая не целые[13].

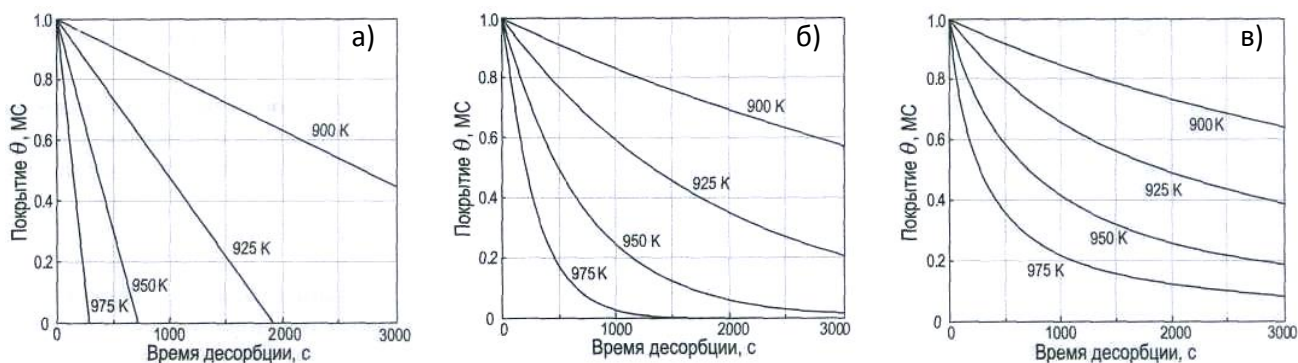
Два основных экспериментальных метода для определения порядка кинетики и энергий активации десорбции:

- а) изотермический метод;
- б) метод программирования температуры.

В изотермическом методе, который также называют изотермической десорбционной спектроскопией, температуру образца быстро нагревает до

определённой температура и поддерживают. Процесс десорбции происходит в изотермических условиях. В эксперименте измеряют скорость десорбции.

Покрывание адсорбата, как функцию времени. Тогда можно определить порядок кинетики ( $n$ ) и величину константы скорости  $k_n$  (рисунок 1.2). Имея набор зависимостей, измеренных при различных температурах, можно получить величину энергии десорбции  $E_{des}$  из наклона зависимости  $\ln k_n$  от  $1/T_s$  [14]



нулевой порядок ( $n=0$ )

$$\Theta = \Theta_0 \left(1 - \frac{k_0 \cdot t}{\Theta_0}\right), \text{ где}$$

$$k_0 = k_0^0 \exp\left(\frac{-E_{des}}{k_B T}\right),$$

$$[k_0] = \left[\frac{MC}{c}\right]$$

первый порядок ( $n=1$ )

$$\Theta = \Theta_0 \exp(-k_1 \cdot t), \text{ где}$$

$$k_1 = k_1^0 \exp\left(\frac{-E_{des}}{k_B T}\right),$$

$$[k_1] = \left[\frac{1}{MC \cdot c}\right]$$

второй порядок ( $n=2$ )

$$\Theta = \frac{\Theta_0}{1 + k_2 \Theta_0 \cdot t}, \text{ где}$$

$$k_2 = k_2^0 \exp\left(\frac{-E_{des}}{k_B T}\right),$$

$$[k_2] = \left[\frac{1}{MC \cdot c}\right]$$

Рисунок 1.2 – Идеальные зависимости покрытия адсорбата от времени, рассчитанные для кинетик десорбции нулевого, первого и второго порядков и разных температур. В расчетах все константы  $k_n$  предполагаются равными  $10^{13} \text{ 1/(MC} \cdot \text{с)}$ , энергия активации десорбции равной  $E_{des} = 3 \text{ эВ}$ , а  $\Theta_0 = 1 \text{ MC}$  (монослой) [13].

#### 1.4 Энергия активации выхода водорода при линейном нагреве образца

Чтобы выходить из металла, адсорбированные частицы должны преодолеть активационный барьер для десорбции, которая называется энергией десорбции  $E_d$ .

Экспериментально наблюдать, что скорость выхода водорода меняется с температурой, но существуют некоторые температуры, при которых газовыделение достигает относительных максимумов. Все адсорбированные атомы или молекулы занимают идентичные места и не взаимодействуют друг с другом, скорость десорбции описывается следующим выражением:

$$r_d = -d\Theta / dt = k_n \Theta^n \exp(-E_d / k_B T) \quad (1)$$

где  $E_d$  – энергия активации десорбции,  $n$  – порядок кинетики десорбции, а  $k_n$  – константа скорости десорбции;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура поверхности. Уравнение (1) называется Полани-Вигнера.

В эксперименте нагрева применяется линейный рост температуры:

$$T(t) = T_0 + \beta t \quad (2)$$

где  $t$  – время, а  $\beta$  – скорость роста температуры.

Из уравнений (1) и (2) следует:

$$E_d = k T_{\max} \left( \ln \frac{\nu_1 T_{\max}}{\beta} - 3.64 \right)$$

где  $\beta$  – скорость нагрева,  $\nu_1 \sim 10^{13} \text{ с}^{-1}$  – собственная частота колебаний кристаллической решетки (частотный фактор десорбции),  $k$  – коэффициент Больцмана,  $T_{\max}$  – температура в максимальной интенсивности [14].

## 1.5 Накопление водорода в титане и извлечение водорода при термодесорбции

В литературе имеется ряд работ посвященных извлечению водорода из конструкционных материалов, остановимся на примере титана. В работе [15] осуществлялось насыщение титана изотопом водорода из щелочного электролита  $\text{LiOD} + \text{D}_2\text{O}$  в условиях постоянной плотности тока  $j = 1 \text{ A/cm}^2$  и разных длительности процесса насыщения: от 20 до 360 мин. Результаты работы приведены на рисунках 1.3 – 1.6.



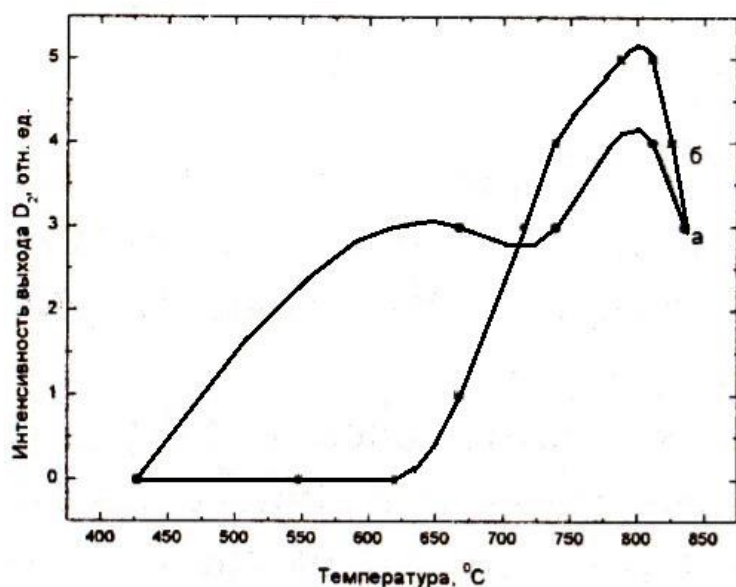


Рисунок 1.3 — Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=1$  А/см<sup>2</sup>,  $t=20$  мин; а, б-различные циклы опытов[15].

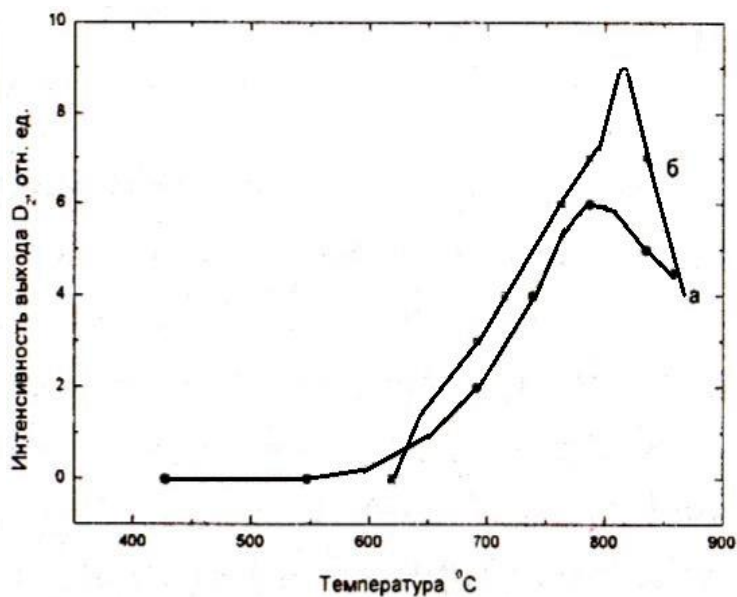


Рисунок 1.4 — Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=1$  А/см<sup>2</sup>,  $t=60$  мин; а, б-различные циклы опытов[15].

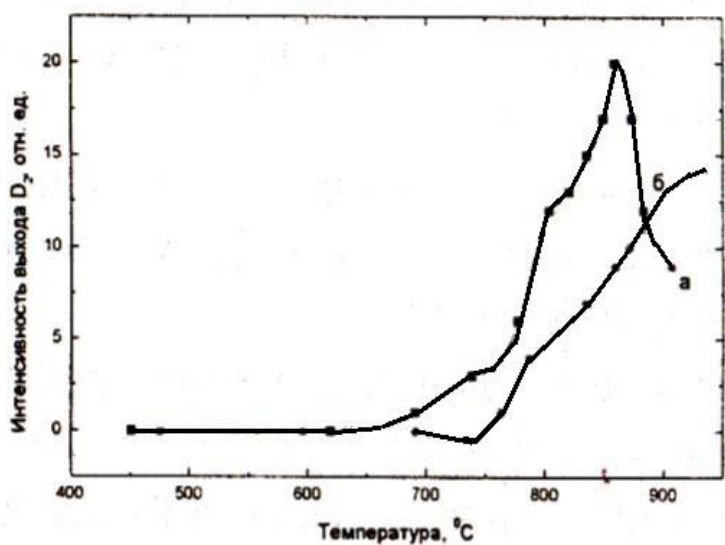


Рисунок 1.5 — Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=1$  А/см<sup>2</sup>,  $t=120$  мин; а, б-различные циклы опытов[15].

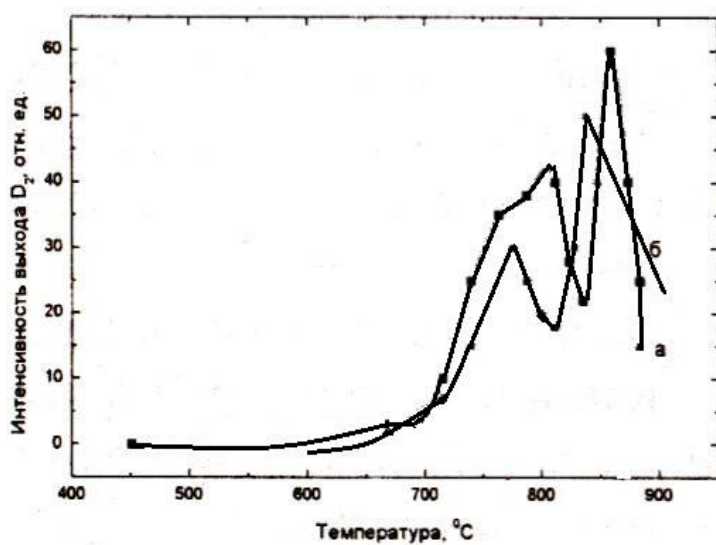


Рисунок 1.6 — Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=1$  А/см<sup>2</sup>,  $t=360$  мин; а, б-различные циклы опытов [15].

Каждые кривые (рисунки 1.3 – 1.6) обладают достаточно широкими пиками, разделяемыми в ряде случаев явно. У каждой кривых высокотемпературный максимум, который приходится на области 850-900°C, и соответствуют энергии активации выхода водорода для титана  $E \sim 2.4$  эВ. Но для

низкотемпературных пиков характерна связь с приповерхностным дейтеросодержащим соединением.

Во второй серии опытов [15] насыщение титана изотопом водорода из щелочного электролита  $\text{LiOD}+\text{D}_2\text{O}$  проводилось в условиях постоянной времени (120 мин) и разных плотности тока: от 50 до  $2000\text{mA}/\text{cm}^2$ , кривые интенсивности выхода водорода из титана показаны на рисунках 1.7–1.10. Кривые обладают достаточно широкими пиками, разделяемыми на несколько элементарных. Причем, когда ток насыщения растёт, ширина пиков увеличивается. Это явление может быть из-за того, что в условиях большой плотности токов на поверхности титана образуются карбидные соединения. Наблюдается характерная тенденция смещения высокотемпературного максимума в область низких температур с ростом тока электролиза.

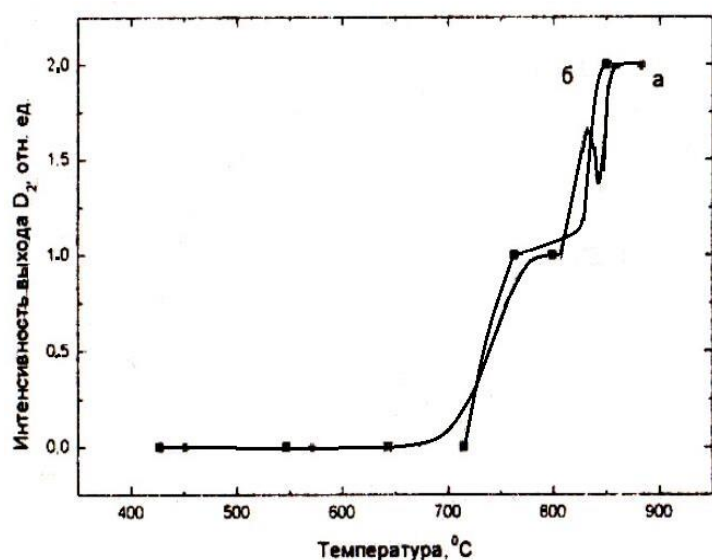


Рисунок 1.7 – Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=50\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $t=120\text{мин}$ ; а, б- различные циклы опытов[15].

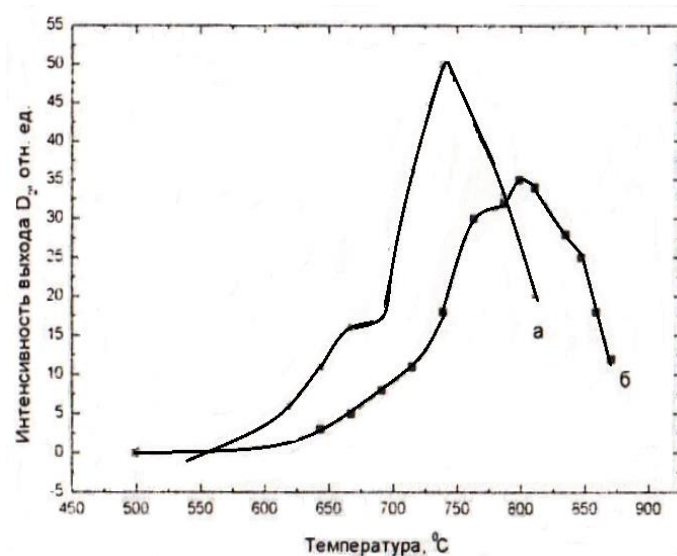


Рисунок 1.8 – Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=250\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $t=120\text{мин}$ ; а, б- различные циклы опытов [15].

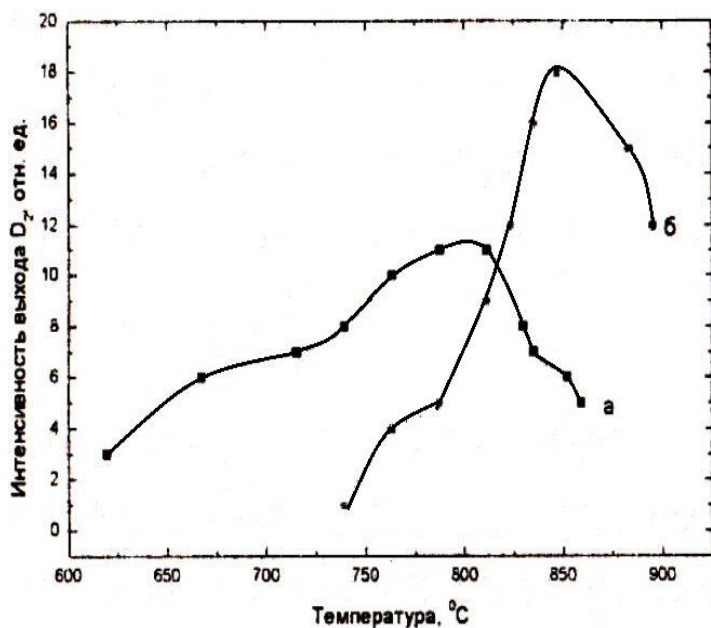


Рисунок 1.9 – Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=1\text{A}/\text{см}^2$ ,  $t=120\text{мин}$ ; а, б- различные циклы опытов[15].

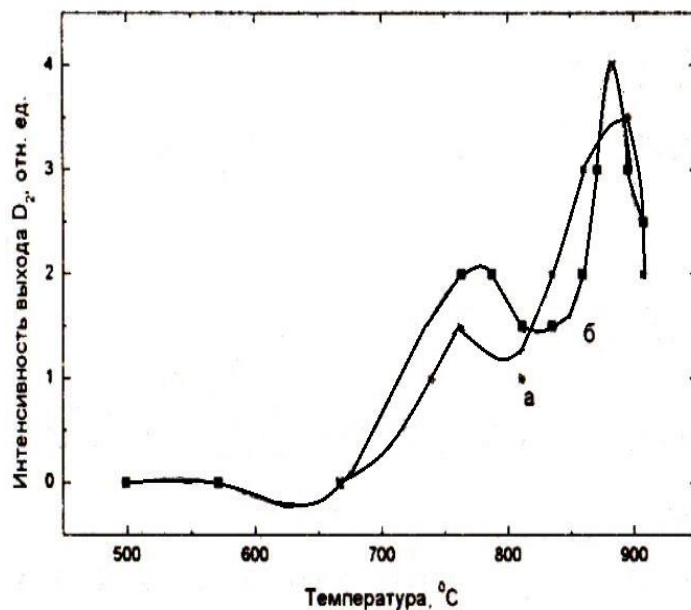


Рисунок 1.10 – Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=2\text{A}/\text{см}^2$ ,  $t=120\text{мин}$ ; а, б- различные циклы опытов[15].

В третьей серии опытов [15] насыщение титана изотопом водорода проводилось в условиях постоянного зарядов, которые проводят через единицу площади образца.

$$\frac{dp}{dS} = jt = \text{const} = 7200\text{Кл}/\text{см}^2$$

Плотность тока насыщения изменялась от 50 до 2000мА/см<sup>2</sup> время насыщения от 60 до 2400 мин.

Результаты накопления дейтерия при постоянном заряде показаны рисунки 1.11–1.14. Все кривые термогазовыделения уширены и содержат несколько пиков. В условиях высокотемпературный максимум и в этом случае приходится на области 850-900 °С, низкотемпературный: 700-780 °С. Причина разных результатов газовыделения представляет различные свойства поверхностных пленок, которые образуются в процессе насыщения.

Все кривые термогазовыделения обладают уширенному виду, который содержат несколько пиков. В условиях постоянного зарядов накопления дейтерием результаты показаны рисунок 1.11 – 1.14.Высокотемпературный максимум и в этом случае приходится на области 850-900°С,

низкотемпературный: 700-780°C. Причина разных результатов газовыделения представляет различные свойства поверхностных пленок, которые образуются в процессе насыщения.

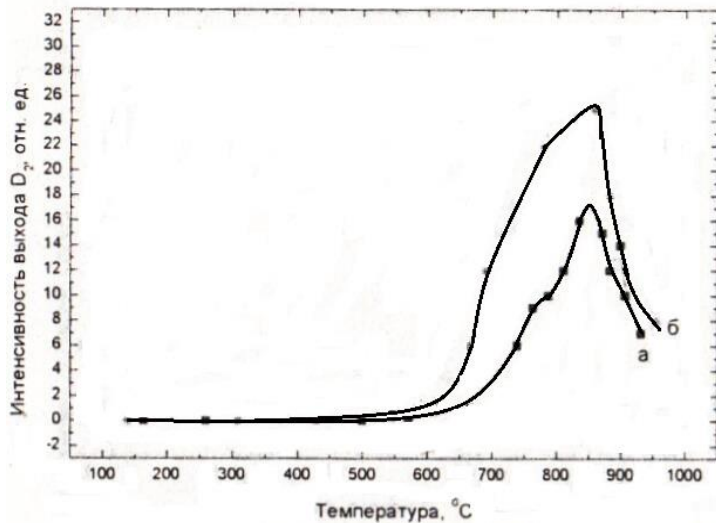


Рисунок 1.11 – Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=50\text{mA/cm}^2$ ,  $t=120\text{мин}$ ; а, б- различные циклы опытов[15].

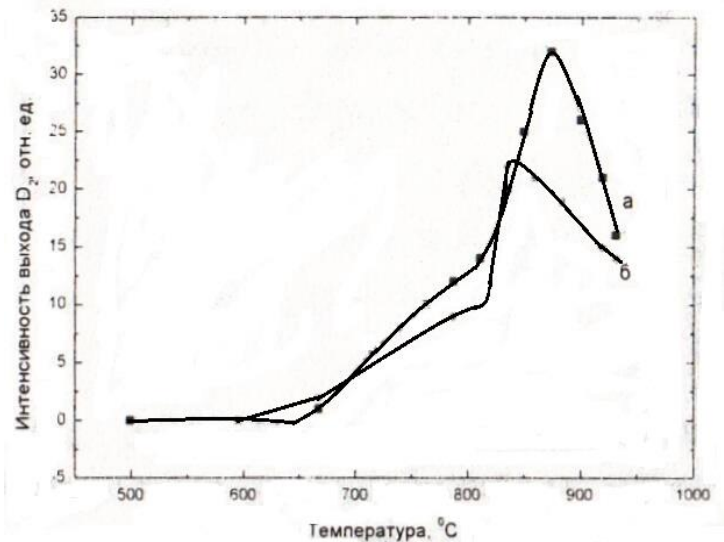


Рисунок 1.12 – Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=0,1\text{A/cm}^2$ ,  $t=1200\text{мин}$ ; а, б- различные циклы опытов[15].

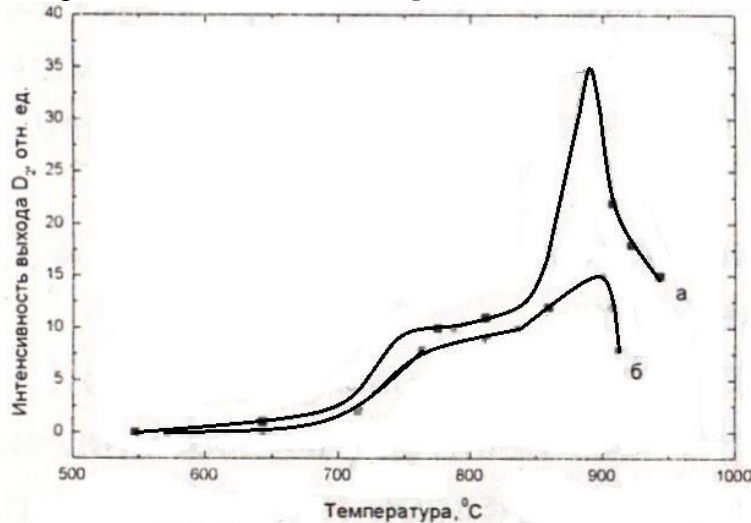


Рисунок 1.13 – Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=0,2\text{A/cm}^2$ ,  $t=600\text{мин}$ ; а, б- различные циклы опытов[15].

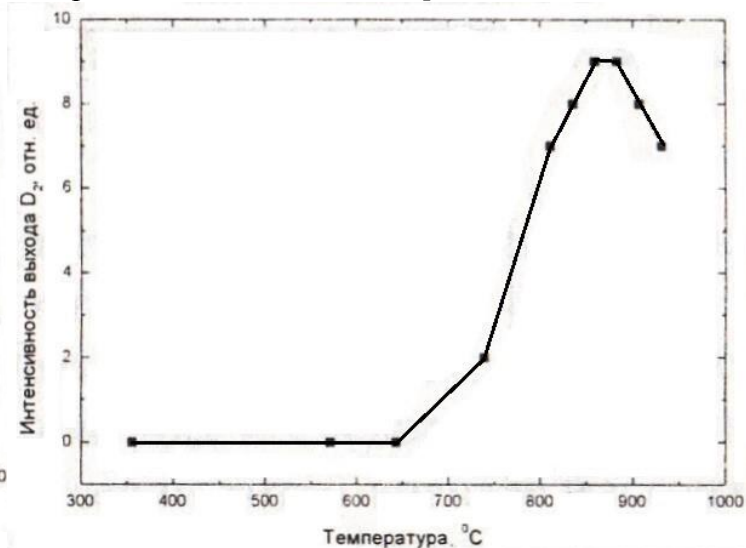


Рисунок 1.14 – Интенсивность термостимулированного выхода дейтерия титана, скорость нагрева 0,3 град/с,  $j=0,5\text{mA/cm}^2$ ,  $t=240\text{мин}$  [15].

### 1.5.1 Накопление водорода в деформированных титане и извлечение водорода при термодесорбции

В первой серии [15] титан вначале насыщали водородом, потом растягивался. Во второй серии вначале титан растягивался, затем насыщали водородом. Кривые интенсивности газовыделения из титана при линейном нагреве приведены на рисунке 1.15.

Максимум выхода водорода приходится на 770 °С, и эта точка соответствует энергии связи около 2 эВ. Вероятно, из-за присутствий на поверхности титана пленки, которые образовались в процессе электролитического насыщения, результаты имеют такую высокую температуру выхода водорода. Если провести интегрирования спектров, то видно, что после растяжения титана содержание дейтерием (кривые 5,6) значительно выше, чем в случае предварительно наводороженного отожженного образца (кривые 3,4). Это значит, что дейтерий эффективно захватывается созданными дефектами, из-за растяжения. Кривые показывают, что максимум содержания дейтерия наблюдается в образце, который подвергнул 6% удлинению (рисунок 1.15 кривая 6).

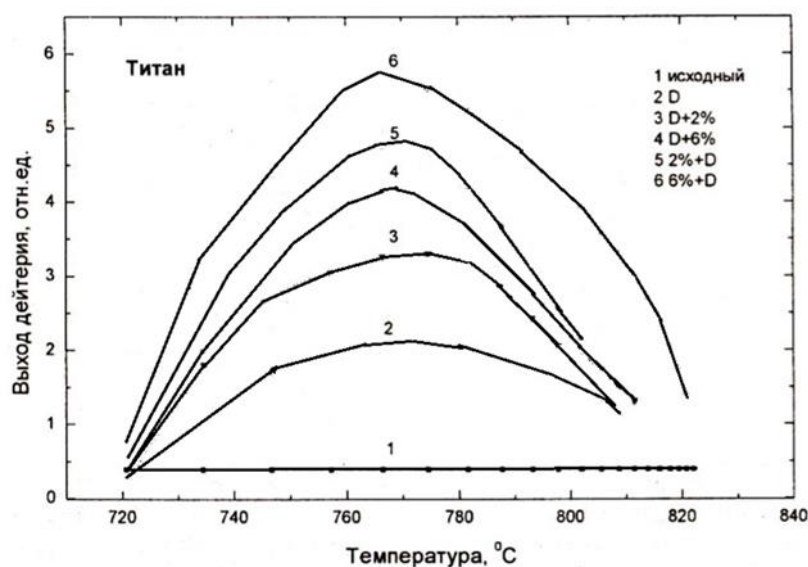


Рисунок 1.15 – Кривые водорода из титана при термодесорбции: 1 – исходный образец; 2 – образец насыщенный D; 3 – насыщенные D; 3,4 – насыщенные D с последующим растяжением; 5,6 – растяжение с последующим насыщением D [15].

## 1.6 Радиационно-стимулированная диффузия газов в металлах

### 1.6.1 Механизм диффузии водорода в металлах

Водород в металлах присутствует в концентрациях  $\geq 10^{19} \text{ см}^3$ , преимущественно он располагается в разорванных связях, улавливается точечными дефектами, дислокациями и микрополостями. Как считает Lee Jai-Young и Donovan J.A. [16-17], что в условиях облучения электронами с энергией ниже образования дефектов возможен: срыв «стопоров», радиационно-стимулированная десорбция водорода с границ зерен [18], неравновесная диссоциация молекулярного водорода в микрополостях [19]. Атом водорода имеет высокую подвижность, когда совершается  $10^{12}$  перескоков в секунду ( $T=300\text{K}$ ), что на 15-20 порядков выше, чем подвижность тяжелых примесей при тех же температурах [20].

При облучении «водородная атмосфера», которая находится в твёрдом теле, переходит в неравновесное состояние. Это связано с тем, что частные частоты Н-содержащих связей находятся вне фононного спектра, и когда происходит релаксация частоты Н-содержащих связей вынуждены генерировать 3-5 фотонов или передают энергию друг другу по диполю (это заряд электронной подсистеме твердого тела). Скорость (частота) этого процесса составляет  $10^7\text{-}10^{10} / \text{с}$  [21], и до релаксации Н-содержащая связь может совершить  $10^5\text{-}10^6$  колебаний. Неравновесное состояние внутренней «водородной атмосферы» обеспечивает колебательный обмен, равновесное перераспределение и выход водорода в условиях облучения. Поэтому даже в металлах с быстрой релаксацией в электронной подсистеме ( $\tau \leq 10^{-13}\div 10^{-14}$ ) присутствие водорода обеспечивает аккумуляцию энергии и способствует движению водорода. Электроны, которые находятся в возбужденном состоянии, ускоряют процесс передачи энергии первичного пучков электронов и  $\gamma$ -квантов и другим колебательным степеням свободы внутренней Н-содержащих связей. При этом миграция водорода становится термически неравновесной и стимулируется не энергией тепловых колебаний  $kT$  в



фононной подсистеме кристаллов, а энергией долгоживущих неравновесных колебательных возбуждений  $\hbar\omega$  в водородной атмосфере кристалла [22].

Если сравнить равновесный и неравновесный коэффициент диффузии водорода можно оценить энергию неравновесного колебательного возбуждения в водородной подсистеме металлов.

В условиях неравновесного возбуждения внутренней, эффективный коэффициент диффузии водородной подсистемы описывается [23]:

$$D^{\text{эф}} = \frac{\Gamma_{\text{ex}}}{\Gamma + \Gamma_{\text{ex}}} D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{\eta\omega}\right)$$

где  $\Gamma_{\text{ex}}$  – скорость возникновения колебательно-возбужденных состояний в водородной подсистеме металла;  $\Gamma$  – скорость релаксации колебательно-возбужденных состояний в металлах.  $E_D$  – энергия активации диффузии (0.5 эВ для Н в титане [20]), и, поскольку при 313К между равновесным

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right)$$

и эффективным коэффициентами диффузии обладает соотношением [23]:

$$\frac{D^{\text{эф}}}{D} = 30$$

то  $\hbar\omega=0.045$  эВ

Таким образом, степень неравновесности ( $\hbar\omega/kT$ ) и время жизни возбужденной водородной подсистемы в металлах могут быть велики и достаточны для стимуляции неравновесной диффузии и выхода водорода из металлов при облучении.

Другой причиной неравновесного выхода водорода из титана под действием электронного пучка является понижение потенциального барьера на пути выхода водорода из титана с поверхности в вакууме, а также ускорение рекомбинации атомов водорода в молекулы и неравновесной десорбции.

В условиях достаточно большой концентрации Н-содержащих связей в титане колебательные возбуждения от места их возникновения начинают «расплываться» по всему объему образца в связи с резонансным обменом колебательной энергией между связями, которые находятся в эквивалентных позициях (рисунок 1.16). Поскольку частоты колебаний  $\omega$  легких атомов Н

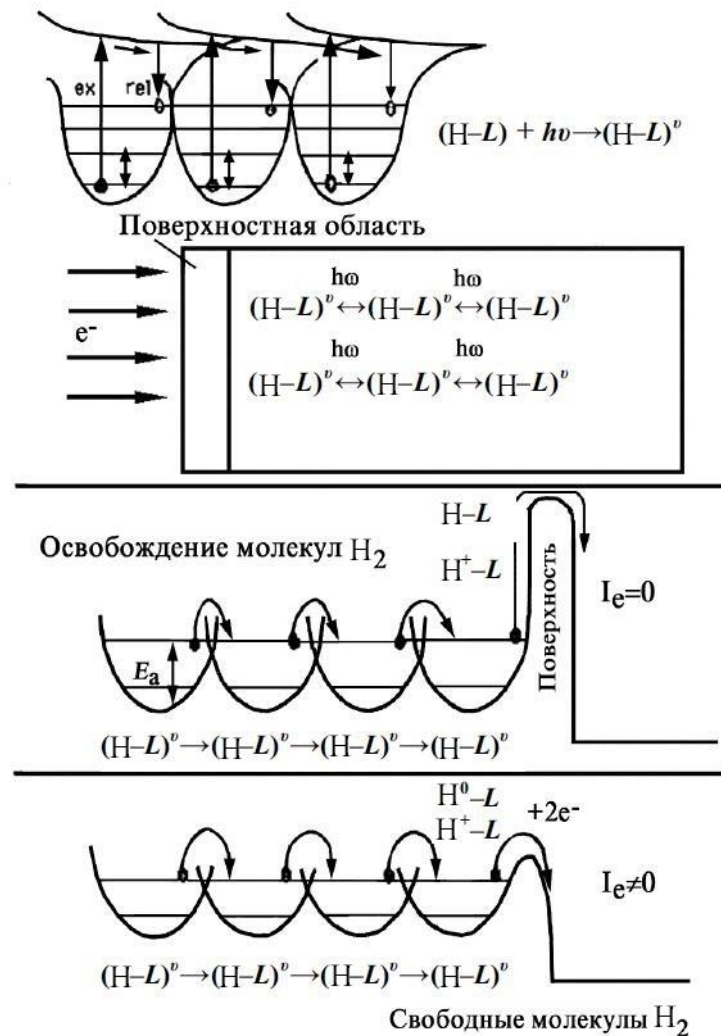


Рисунок 1.16 – Модель механизма диффузии водорода в металлах под действием ускоренных электронов [23]

лежат вне фононного спектра кристалла, то релаксация этих связей по фононному механизму затруднится, и водородная подсистема металла переходит при сообщении энергии излучения в неравновесное колебательно-возбужденное состояние с энергией  $\hbar\omega$ , которая превосходит тепловую  $kT$ .



Когда энергия колебательного возбуждения  $(H-L)^0$  связи превышает активационный барьер на пути перехода между двумя эквивалентными состояниями в решетке, то неравновесная водородная диффузия начинается по объему металла. Когда происходит выход водорода из титана, он должен преодолеть поверхностный потенциальный барьер, который в свою очередь связан с изменением размерности системы и захватом электрона. Этот потенциальный барьер тоже может быть заметно снижен в месте воздействия на образец электронного пучка, где процесс нейтрализации, когда равновесие нарушится, а сам выход на поверхность помимо этого ускоряется возбуждением водородной подсистемы кристалла (рисунок 1.16).

Эффективным каналом  $\gamma$ - и электронно-стимулированного возбуждения водородной подсистемы в твердых телах может служить процесс с вовлечением оже-электронов. При оже-релаксации активных дырок в остовах, возможен переброс внешних электронов с одного состояния в другое с дальнейшим распадом связи. Вероятность электронного оже-перехода определяется избытком подведенной энергии  $\Delta E$  и равна  $\eta = \alpha \Delta E^3$ , где  $\alpha$ -постоянная. Сечение десорбции H с поверхности  $\langle 111 \rangle$  для Pd под действием электронов с энергией 100 кэВ и плотностью  $1.3 \text{ мА/см}^2$  равно  $10^{23} \text{ см}^2$  [24]; сечение фотодесорбции  $\text{H}_2\text{O}$  с поверхности стекла равно  $4 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$  [25]; сечение десорбции водорода с поверхности нержавеющей стали составляет  $10^{-18} - 10^{-20} \text{ см}^2$  [26].

### **1.6.2 Модель диффузии водорода в металлах под действием ускоренных электронов**

Механизм выхода водорода из металлов под действием радиационно-стимулированному связан с аккумуляирующими свойствами внутренней водородной атмосферы, имеющей частоты колебания, которое лежат вне фононного спектра кристалла. При подводе энергии излучением происходит возбуждение колебательных степеней свободы водородной подсистемы.

Колебательно-колебательный обмен может эффективно происходить между примесными состояниями и водородной подсистемой. Поэтому диффузия изотопов водорода и других примесей становится неравновесным процессом, который стимулирует наличие внутренней водородной атмосферы, которую возбуждает внешнее излучение. В отличие электронной подсистемы металлов, водородная подсистема способна сохранять подведенную энергию достаточно долгое время, которое необходимо для реализации процессов диффузии. Неравновесный выход водорода определяется концентрацией водорода и коллективными свойствами возбуждаемой атмосферы.

Дополнительной причиной неравновесного выхода водорода из титана под действием электронного пучка является эффективное снижение потенциального барьера на пути выхода водорода из титана на поверхность в вакууме, а также ускорение рекомбинации атомов водорода в молекулы и неравновесной десорбции. Десорбция молекулы энергетически более выгодна по сравнению с десорбцией атома. Так, в круговом цикле (над стрелками указаны энергосвободные изменения в реакциях) [23]



имеем для теплоты десорбции атома и молекулы

$$q_1 = \frac{Q + q_2 - q_p}{2}, q_2 = q_p + 2q_1 - Q$$

Теплота десорбции атома больше, чем у молекулы ( $q_1 > q_2$ ), когда

$$\frac{4}{3}q_1 + q_p \leq Q + \frac{q_2}{3}$$

Последнее неравенство выполняется для большинства металлов.

### 1.6.3 Основные механизмы радиационно-стимулированной десорбции газов

С помощью электронного возбуждения десорбция адсорбированных частиц осуществляется путём стимуляции фотонами или электронами. Но использование электронов более распространённо и открыто в начале XX века. Электронно-стимулированная десорбция описает в общем смысле для обозначения физических и химических изменений в приповерхностной области конструкционных материалов. А при действии радиационно-стимулированных, а часто и тепловые, эффекты, которые приводят к изменениям физическим и химическим, производят.

Наблюдается, что целый ряд электронно-стимулированных процессов происходит на поверхности, включая переход из одного связанного состояния в другое состояние, например, в диссоциацию. Поскольку относительно легко детектируются заряженные частицы, противоположные по знаку падающим электронам (и испущенным вторичным электронам), то заметное большинство работ проводилось по эмиссии положительных ионов. Все эти эффекты наблюдаются при низких плотностях мощности потока электронов ( $10 - 10^{-1} \text{ Вт/м}^{-2}$ ), так что эффекты нагрева поверхности слишком малы, чтобы быть замеченными или чтобы вызвать термическую десорбцию.

Первые исследователи [27] наблюдали линейную зависимость скорости выхода ионов в ЭСД (электронная стимулированная десорбция) от тока бомбардирующих электронов, таким образом, процесс столкновения между электроном и частицами адсорбата является изолированным актом. Кроме того, было обнаружено, что наиболее вероятные кинетические энергии испускаемых ионов составляют примерно 8 эВ [28]. А возможные механизмы испускания ионов – прямая передача импульса от бомбардирующих электронов к частицам адсорбата аналогичны процессам газофазной ионизации – диссоциации. Закон сохранения энергии и импульса покажут, что прямая передача импульса от медленных ( $< 500 \text{ эВ}$ ) электронов адсорбату слишком мала для объяснения

большинства наблюдаемых процессов. Максимальная кинетическая энергия  $E$ , передаваемая свободной частице описывается [29]:

$$\Delta E = 4E_s [m_e m / (m_e + m)^2] \approx 4E_s m_e / m,$$

где,  $m$  – масса свободной частицы,  $m_e$  – масса электрона,  $E_s$  – начальная кинетическая энергия.

По аналогии с двухатомной молекулой потенциальная энергия взаимодействия между поверхностью металла-подложки  $M$  и атомом адсорбата  $A$  показана на рис 1.17 Это крайняя описывает нижайшее связанное состояние системы металл – адсорбат.  $E_d(A)$  является энергией связи атома  $A$ . Верхняя кривая соответствует состоянию  $M+A^+e^-$ . На больших расстояниях от поверхности эти кривые различаются лишь сдвигом по энергии на величину ионизационного потенциала свободного атома  $E_i(A)$ . После бомбардировки электронами могут происходить переходы из связанного состояния  $M+A$  в состояние с отталкивающим потенциалом на верхней кривой. Область возможных межъядерных расстояний в основном состоянии покажет на ширине заштрихованной области, тогда как вероятность определенного межъядерного расстояния равна квадрату волновой функции основного состояния осциллятора  $M-A$ . Принцип Франка-Кондона доказать, что диапазон межъядерных расстояний, разрешенных системы для  $M - A$ , не изменяется сразу после перехода, и конечные состояния на верхней кривой также распределяются по области Франка – Кондона. Например, ионы образовавшиеся на отталкивающей части кривой ( $M+A^+e^-$ ), могут десорбироваться с кинетическими энергиями, область значений которых показана справа. Реальный выход положительно заряженных ионов и фактическое распределение по энергии часто сопровождается повторной нейтрализацией. В частности, может осуществляться обмен зарядами посредством либо эффект Оже, либо резонансной нейтрализации. Повторная нейтрализация иона приводит к переходу обратно в связанное состояние  $M-A$ . В зависимости от кинетической энергии, приобретенной ионом до нейтрализации,

атом А может быть или захвачен в колебательно-возбужденное основное электронное состояние, или десорбироваться как нейтральный [29].

Хотя на рисунке 1.17 показано такое расположение кривых потенциальной энергии, при котором ионные состояния в области расстояний, определенных для начального основного состояния системы, являются отталкивающими, это не обязательно должно быть так. Более того, возможны переходы в другие состояния системы М–А.

Из рисунка 1.17 можно видеть, что возбуждение из основного состояния в отталкивательную часть ионного состояния сопровождается либо десорбцией иона, либо повторной нейтрализацией. Если нейтрализация происходит до прохождения ионом некоторого критического расстояния  $X_c$ , то это приведет к повторному захвату. С другой стороны, если повторная нейтрализация происходит после того, как ион прошел расстояние  $X_c$ , то образовавшийся нейтральный атом будет обладать энергией, достаточной для ухода с поверхности [29].

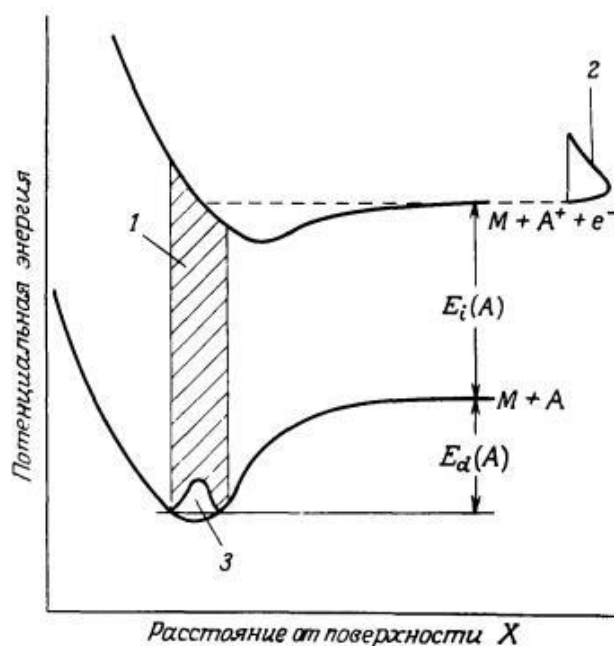


Рисунок 1.17 – Схематические потенциальные кривые взаимодействия между поверхностью М атомом А и между поверхностью М и ионом  $A^+$ . Возможный электронный переход в  $A^+$ , приводящий ЭСД, показан заштрихованной областью. 1 – франк-кондоновская область; 2 – распределение ионов по энергии; 3 – распределение вероятности возможных расстояний [29].

#### 1.6.4 Радиационно-стимулированный выход водорода при разных энергиях электронов

На рисунке 1.18 представлен спектр РСГВ из палладия от энергии электронного пучка [30]. Энергия электронного пучка изменялась 10 – 100 кэВ. Ток, действующий на Pd, изменялся 3 – 6 мкА. Подводимая мощность является постоянной:

$$I \cdot U = const$$

где  $I$  – ток электронного пучка,  $U$  – ускоряющее напряжение.

Зависимость интенсивности газовыделения палладия при разных энергиях электронов с различной энергией показывает, что выход интенсивности  $D_2$  уменьшается тем быстрее, чем меньше энергия электронов (кривые 1,2). Это потому что электрон с малых энергией легко поглощается тонким приповерхностным слоем палладия, и стимулирует интенсивный выход дейтерия из палладия. По мере изменения приповерхностного слоя скорость выхода  $D_2$  из металла уменьшается и приближается к равновесному выходу  $D_2$  из палладия, (кривая 3). С ростом энергии электронного пучка электроны могут прибыть на все большую глубину и стимулируют газовыделение из более больших объемных областей образца, при такой энергии газовыделение приближается к равновесному выходу  $D_2$  (кривая 2). При энергиях 80 кэВ скорость изменения интенсивности газовыделения оказалась близкой к скорости спада интенсивности при равновесном выходе  $D_2$  из палладия, но интенсивность линии при этом в 3 раза выше, чем при термической стимуляции (кривые 2 и 3). Температура образца палладия на лицевой стороне, подвергающейся действию электронного пучка такая же, как и при равновесном нагреве образца, 60°C. Во всех случаях  $R$  (глубина достижения электронов)  $< d$  (толщина образца) - область непосредственного возбуждения не захватывает всего объема образца.

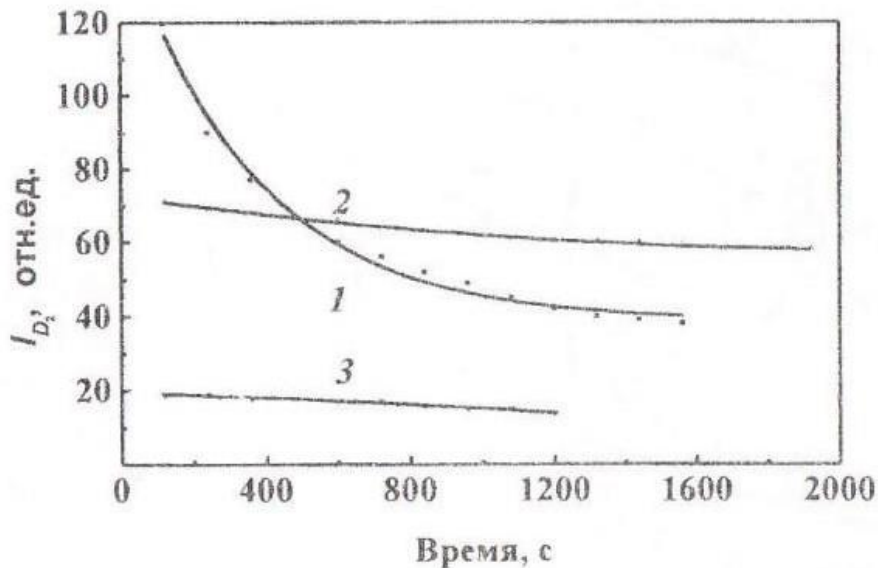


Рисунок 1.18 – Зависимость от времени интенсивности радиационно-стимулированного выхода дейтерия из палладия под действием пучка ускоренных электронов. 1 –  $I=6\text{ мкА}$ ,  $E=40\text{ кэВ}$ .  $T < 60^\circ\text{C}$ . 2 –  $I=3\text{ мкА}$ ,  $E=80\text{ кэВ}$ ,  $T < 60^\circ\text{C}$ . 3 – термически равновесный выход дейтерия из палладия  $T=60^\circ\text{C}$  [30].

## 1.7 Глубина проникновения электронов

Однако на практике для оценки максимальных размеров области генерации часто используют приближенные формулы. В частности, для определения максимального пробега  $R$  электрона с энергией  $E_0$  в материале со средним атомным номером  $Z$ , средним атомным весом  $A$  и плотностью  $\rho$  используется формула Канайа-Окаямы[31]:

$$R(\text{мкм}) = 0.0276 \frac{AZ^{-8/9}}{\rho(\text{г/см}^3)} E_0^{5/3}(\text{кэВ})$$

Эту формулу можно использовать для оценки максимальной глубины, с которой происходит генерация катодolumинесценции, так как размер области генерации катодolumинесценции близок к максимальному пробегу электрона.

Кроме того, существует другой метод для определения глубины проникновения электронов. Установлено, что электроны

Установлено, электроны, обладающие определенной энергией, могут проникать в вещество. Толщина слоя вещества, пройдя который электрон полностью теряет скорость, определяет его пробег. Пробеги электронов в металлах при сравнительно небольших энергиях электронов (10-82 кэВ) были

изучены. Б. Шенландом. Согласно Шенланду пробег (в см) электронов выражается зависимостью [32]

$$\delta = 2.6 \cdot 10^{-12} \frac{U^2}{\rho}$$

где  $U$  – разгоняющее напряжение, В;  $\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>. Расчеты показывают, что электроны в зависимости от разгоняющего напряжения и свойств металла могут проникать на глубину нескольких десятков и даже сотен микрометров. Глубина проникновения электронов в металл невелика, но учет ее позволяет объяснить некоторые эффекты, связанные с особенностями электронного нагрева при сварке.

## **Вывод**

На основании выше изложенного можно заключить следующие:

1. Рассмотрены физические принципы растворения водорода, структура титан-водород и растворение водорода в титане;
2. Изучены механизмы термо- и радиационно- стимулированной десорбции и диффузия;
3. Во время электролитического наводороживания, при постоянном токе насыщения, содержание (интенсивность выхода) водорода: увеличивается с ростом времени насыщения; увеличивается с ростом тока насыщения: увеличивается с ростом времени насыщения и уменьшением плотности тока насыщения.



## **2 Объект и методы исследования.**

### **2.1 Материал исследований**

Объектом исследования является технически чистый титан BT1-0 в виде плоских образцов размером  $10 \times 7$  мм

Для данного эксперимента подготовка образцов является очень важным шагом. Качество (чистота) поверхности образца сильно влияет на насыщение водородом и интенсивность газовой выделенности газов, и отражается на точности экспериментальных результатов. Перед насыщением образцов водородом поверхность механически шлифовали и полировали.

### **2.2 Насыщение водородом электролитическим методом**

Растворение обусловлено следующими процессами [33]:

- 1) диффузией, связанной с наличием градиента концентрации водорода;
- 2) дрейфом водорода под действием приложенного электрического поля;
- 3) абсорбцией ионов водорода адсорбируются на катод;
- 4) входом ионов водорода в катод и получением электронов.

Наличие процесса разряда ионов водорода представляет собой необходимое условие наводороживания титана в водных средах. И движущая сила растворения является внешним или внутренним напряжением, и растворение водорода приводит к хрупкому разрушению и появлению трещин.

Установка для насыщения водородом состоит из катода (титан), анод (проводник), и электролитической ячейки (рисунок 2.1). Электролит является 1М  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Образец выступает в качестве катода, под действием электрического поля ионы водорода движутся к катоду и «растворяют» в нем.

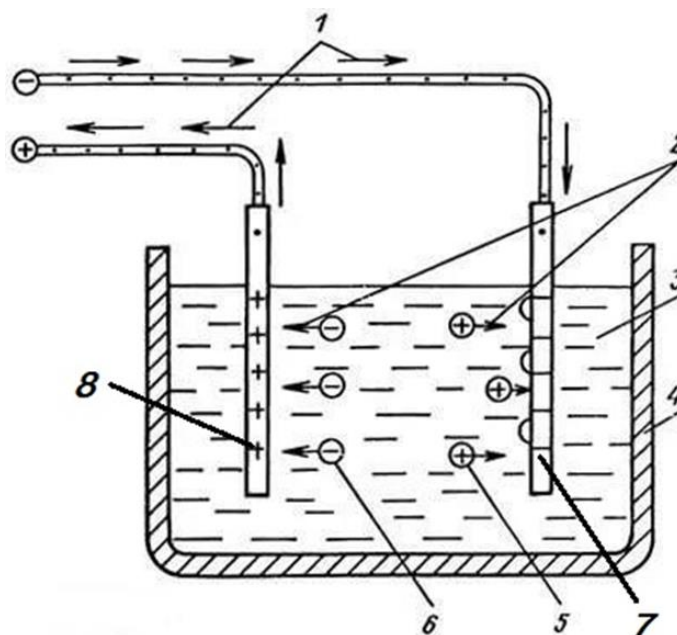


Рисунок 2.1 – Функциональная схема установки для исследования насыщения водородом: 1 – направление электронов; 2 – направление движущегося ионов; 3 – электролит ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ); 4 – корпус; 5 – положительные ионы (ионы водорода); 6 – отрицательные ионы; 7 – катод (титан); 8 – анод.

### **2.3 Определение содержания водорода с помощью анализатора водорода RHEN602 фирмы LECO**

Одним из методов определения содержания водорода в исследуемом материале является метод экстракции водорода в среде инертного газа (аргон). На данном методе основана работа анализатора водорода RHEN602 фирмы LECO (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Анализатор водорода RHEN602 [34]

Принцип измерения содержания водорода основан на регистрации изменения теплопроводности в измерительной части термокондуктометрической

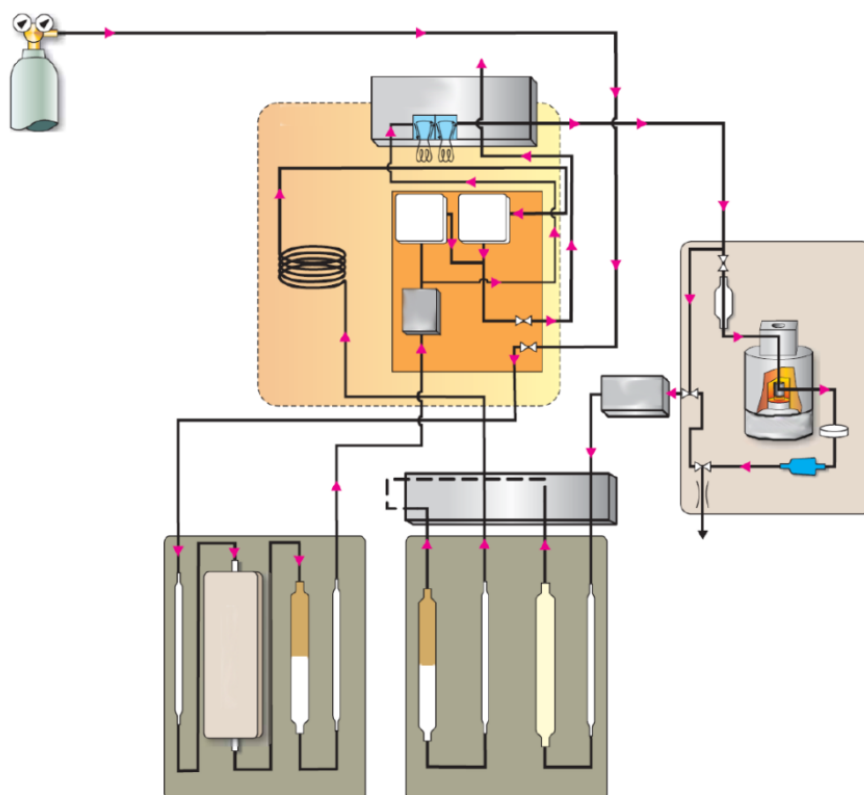


Рисунок 2.3 – Блок-схема анализатора RHEN602 [34]

(ТК) ячейки. На рисунке 2.3 приведена блок-схема анализатора RHEN602 фирмы LECO. Принцип работы термокондуктометрической (ТК) ячейки основан

на измерении теплопроводности проходящего газа. В полость металлического блока детектора по теплопроводности помещена нить накаливания из металла (например, Pt, W, их сплавы, Ni и др.) с высоким температурным коэффициентом сопротивления. Нить начинает нагреваться при прохождении через неё постоянного тока. При омывании нити накала чистым газом-носителем, её температура остается постоянной, так как она теряет постоянное количество теплоты. Как только нить накала начинает омывать газ, содержащий примеси, имеющие другие показатели теплопроводности, температура нити начинает изменяться. Это приводит к тому, что происходит изменение сопротивления нити. Изменение сопротивления нити измеряют с помощью мостика Уинстона. Мост находится в равновесии, если температура обеих нитей одинакова и сопротивление, соответственно. При изменении состава газа изменяется сопротивление нитей и происходит нарушение равновесия и формируется выходной сигнал. Работа детектора устроена так, что он реагирует на все компоненты, кроме газа-носителя [35].

Работа анализатора начинается с установления пустого графитового тигля на нижний электрод и нажатии кнопки загрузчика. После закрытия электродов начинается процесс очистки тигля от атмосферных газов, который именуется как дигазация. Данный процесс сопровождается протеканием электрического тока через тигель, который разогревает его до высокой температуры, что способствует высвобождению газов, находящихся в графите. Затем образец из верхнего загрузочного устройства опускается в тигель. На тигель подается ток, который способствует высвобождению газов из образца. Для того, чтобы не происходило дальнейшего процесса дегазирования тигля во время анализа. Подается меньшая сила тока.

Для очистки от кислорода газ-носитель из баллона проходит через медь. Затем он проходит через такие реагенты как Lescorb и Ангидрон, для удаления CO<sub>2</sub> и влаги, соответственно. Данная процедура очистки газа-носителя проводится для того, чтобы очистить его перед прохождением через опорную часть термокондуктометрической ячейки и попаданием в печь [34].

По мере нагревания образца, водород выделяется в транспортирующий газовый поток и проходит через участок измерения потока системы. Газ образца из печи проходит через контроллер потока массы и через реагент Schutze, который преобразовывает CO в CO<sub>2</sub>. Потом газ образца проходит через реагенты Lecsorb и Ангидрон, которые удаляют CO<sub>2</sub> и влагу. На колонку молекулярного фильтра поступает очищенный от примесей газ, где в зависимости от размера молекул разделяется на компоненты газа. Через измерительную часть ТК ячейки проходит только водород, который содержится в образце.

Сигнал, получаемый с измерительной части ТК ячейки, оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя и далее передается на ПК для последующей обработки с помощью программного обеспечения [34].

Концентрация водорода, которая определяется по данному методу, рассчитывается по формуле:

$$wt = kx + b$$

где  $k$  – калибровочная константа. Данная формула описывает калибровочную прямую, которая получается после проведения серии контрольной калибровки анализатора по определенной концентрации.

## **2.4 Установка для исследования процесса термо- и радиационно-стимулированного выхода водорода**

Установка (рисунок 2.4) для исследования процесса термо- и радиационно-стимулированного выхода водорода включает в себе вакуумную систему, устройство нагрева и систему регистрации параметров для вычисления растворенных и адсорбированных атомов и молекул. Для достижения предельного давления, равного  $10^{-6}$  па, высоковакуумная система состоит из двух насосов для получения низкого давления: форвакуумный насос 9 (ISP-500 C), турбомолекулярный насос 4 (НВТ 100 ФО). Давление камеры измеряется вакуумметрами Stabil-Ion и ВИТ-2 фирмы Granville-Philips.

В установке, выбор масс-спектрометров зависит от поставленной задачи, можно использовать один из двух масс-спектрометров: либо монопольный масс-спектрометр произведено в Украине (МХ-7304), либо квадрупольный масс-спектрометров производство США, анализатор остаточных атмосферных газов Turmoil.

Исследование газовыделения происходит в условиях линейного нагрева. Нагрев осуществляется за счет внешнего нагревателя, изготовленного из нихромовой проволоки намотанный на кварцевую трубку, надетый на камеру 12, (нагрев до температуры  $\sim 1000^\circ\text{C}$ ).

В камере 7 рисунок 2.4 на отдельных фланцах могут размещаться (по очереди, в зависимости от задачи) либо охлаждаемый до азотных температур держатель образца (8, рисунок 2.4), либо ячейка для изучения проницаемости водорода через металлические мембраны.

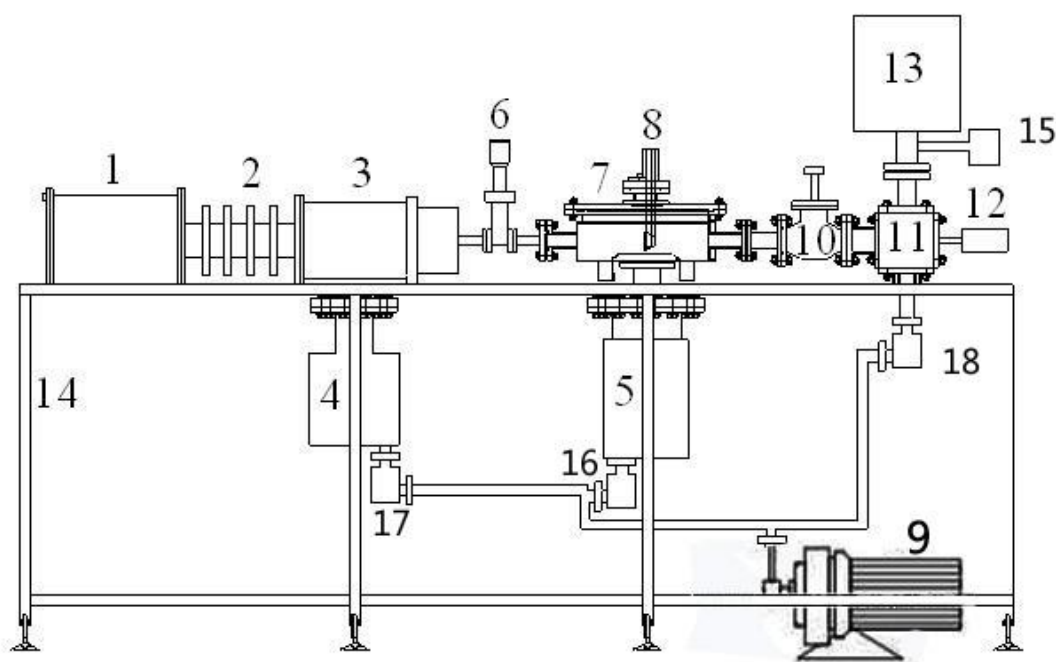


Рисунок 2.4 – Схема вакуумной части установки для исследования термо-и радиационно- стимулированного газовыделения: 1 – блок питания электронной пушки; 2 – изолятор электронной пушки; 3 – фокусирующая система электронной пушки; 4– турбомолекулярный насос (НВТ 100 ФО); 5 – гибридный турбомолекулярный насос (АТН 300); 6 – высоковакуумный затвор; 7 – камера; 8 – ячейка для электронного и рентгеновского облучения образцов; 9 – форвакуумный насос (ISP-250 С); 10 – высоковакуумный вентиль; 11 – камера внутреннего нагрева образца; 12 – камера внешнего нагрева образца; 13 – масс-спектрометр; 14– цельносварная станина. 15 – вакуумметр, 16–вентиль, 17–вентиль, 18–вентиль [36].

Эта установка является системой автоматизации. Компьютерная программа Project служит для регистрации элементарного процесса автоматически и концентрирует производить линейный нагрев образцов от 20 до 1000 °С (и от 20 до 2000 °С) с заданной скоростью от 0,1 до 5 °С/с., и одновременно, термопар фиксируют скорость температуры и данные газовыделении с помощью масс-спектрометра.

На рисунке 2.5 представлена функциональная схема установки для исследования термо- и радиационно- стимулированного газовыделения.

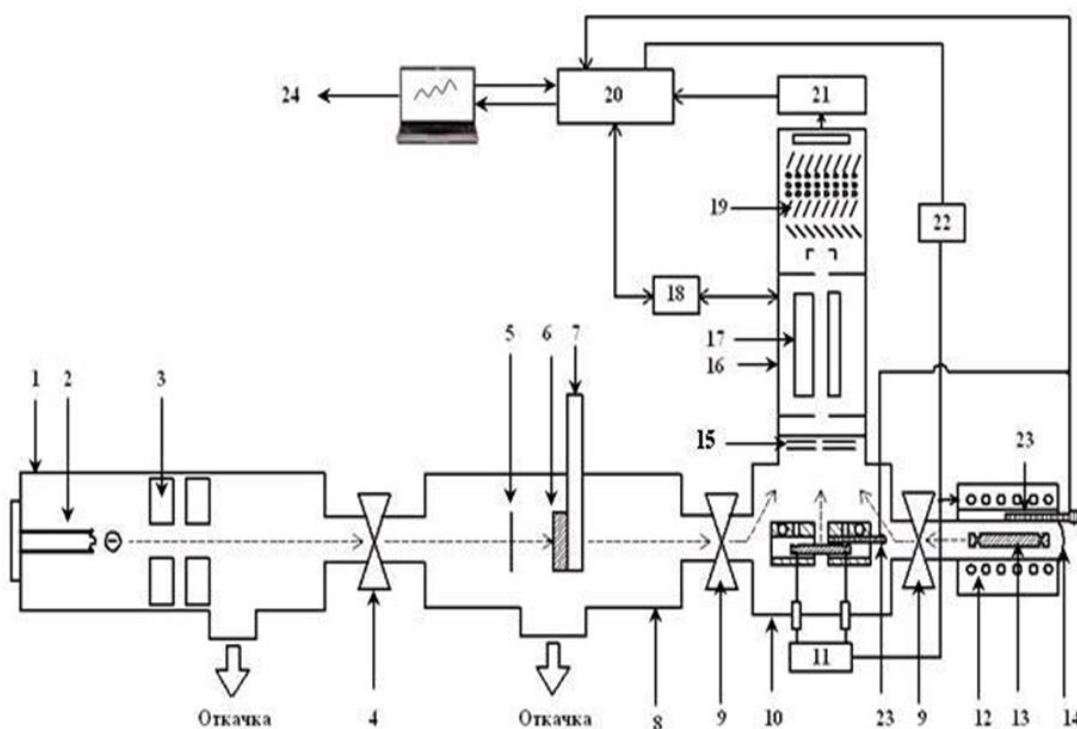


Рисунок 2.5 Функциональная схема установки для исследования термо- и радиационно- стимулированного газовыделения: 1 – электронная пушка; 2 – питание катода электронной пушки; 3 – электромагнитная линза; 4 – шибер; 5 – флажок (вольфрамовая фольга для измерения тока электронов); 6 – образец для радиационно-стимулированных исследований; 7 – устройство охлаждения образца; 8 – высоковакуумная камера; 9 – высоковакуумные вентили; 10 – внутренний вакуумный нагреватель (2000 °С и выше); 11 – блок нагрева для 10; 12 – внешний нагреватель; 13 – исследуемый образец; 14 – ячейка для исследуемого образца 13; 15 –17 – квадрупольный масс-анализатор; 18 – блок управления масс-спектрометром; 19 – детектор масс-спектрометра (ВЭУ); 20 – система автоматического нагрева; 21 – усилитель сигнала с ВЭУ; 22 – блок внешнего нагрева; 23 – термопары; 24 – компьютер [36].

## Вывод

В данной главе представлен комплекс экспериментальных установок для исследования, который использовался для исследования экспериментальных образцов. В разделе 2.2 представлена функциональная схема

электролитической установки для насыщения образцов водородом, в разделе 2.3 представлен анализатор водорода RHEN602 фирмы LECO, позволяющие с высокой точностью определения содержания водорода, в разделе 2.4 приведена установка для исследования процесса термо- и радиационно-стимулированного выхода водорода.



### 3 Результаты проведенного исследования

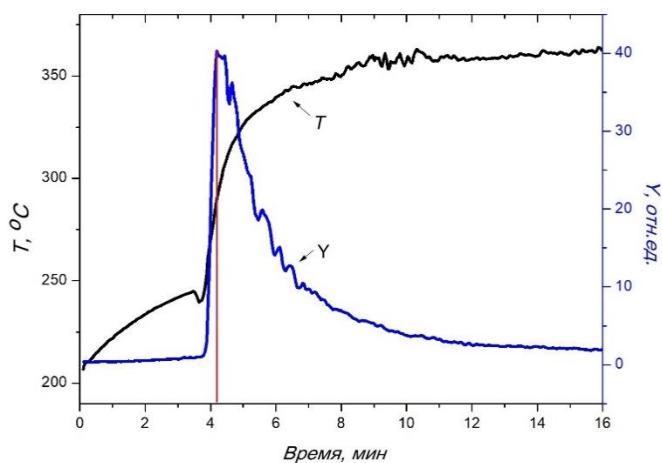
Объектом исследования являлись образцы титана марки Вt1-0 с разным временем облучения, ускоренными электронами, от 15 до 60 мин. Насыщение образцов титана производилось электролитическим методом в течение 120 мин при плотности тока насыщения  $j=0.48 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$  в 1М электролитическом растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Перед облучением ускоренными электронами образцы нагревали до температуры  $250\div 260 \text{ }^\circ\text{C}$ , после достижения и стабилизации указанной температуры поверхность образца начинали облучать. Параметры облучения ускоренными электронами были следующие:

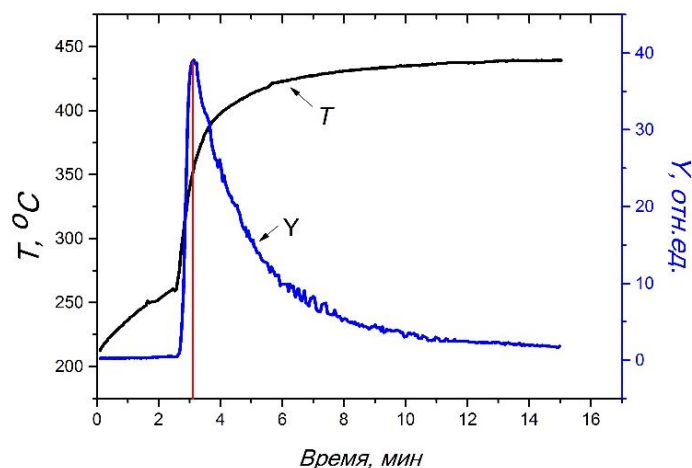
- энергия ускоренных электронов  $E_e = (25-40) \text{ кэВ}$
- время облучения ускоренными электронами  $t_{об} = (15-60) \text{ мин}$
- плотность тока пучка ускоренных электронов  $j_{об} = 0.25 \text{ мкА}\cdot\text{мм}^{-2}$
- температура образца до облучения ускоренными электронами  $T_{обр} \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$

#### 3.1 Влияние времени облучения на выход водорода

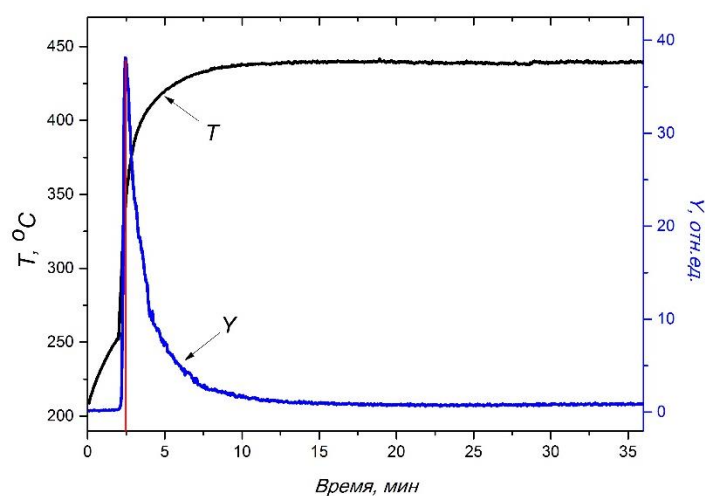
На рисунке 3.1 приведены спектры РСГВ из титана Ti ВТ1-0 при энергии облучения 35 кэВ в зависимости от времени облучения. Из них можно видеть, начало облучения способствует выходу водорода. А дальше с ростом времени облучения, газовыделение медленно спадает. Кроме того, с ростом энергии облучения, ширина пика уменьшается. Это показано, что с ростом энергии облучения скорость газовыделения увеличивается. В работе Mingwang Ma, Lei Wang [37] показано, что в диапазоне температуры  $250 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$  интенсивность выхода водорода достигает максимальной, с ростом времени облучения содержание уменьшается, кроме того, в процессе газовыделения сопровождается фазовым переходом.



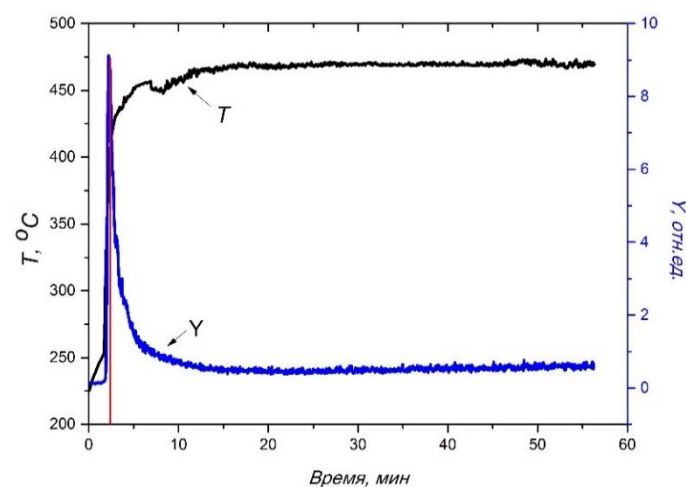
а



б



в

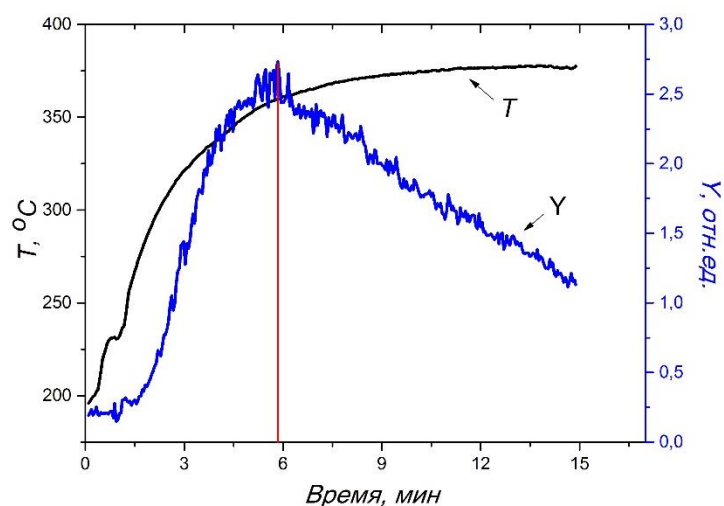


г

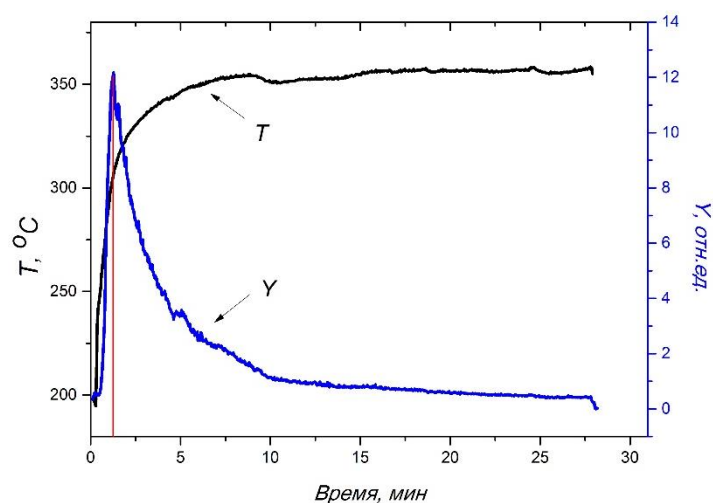
Рисунок 3.1 – Спектр РСГВ из титана ВТ1-0 при энергии облучения 35 кэВ в зависимости от времени облучения: а – 15мин; б – 30мин; в – 45мин; г–60мин.

### 3.2 Влияние энергии ускоренных электронов на выход водорода

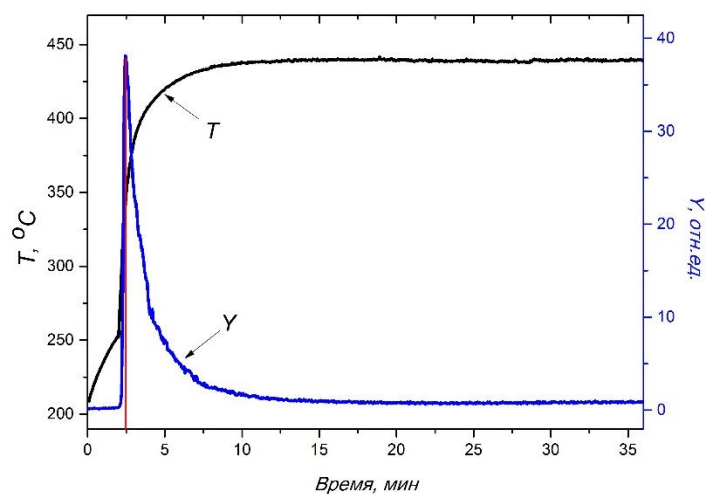
На рисунке 3.2. приведены спектры РСГВ из титана Ti ВТ1-0 при разных энергиях облучения. Из них можно видеть, с ростом энергии ускоренных электронов, интенсивность выхода водорода увеличивается. А дальше с ростом времени облучения, газовыделение медленно спадает. Кроме того, ширина пика газовыделения уменьшается с ростом энергии ускоренных электронов. Это связано тем, чем выше энергии, тем быстрее выхода водорода, тем узкий пик. При температуре  $\sim 350$  °С интенсивность выхода водорода достигает максимальной.



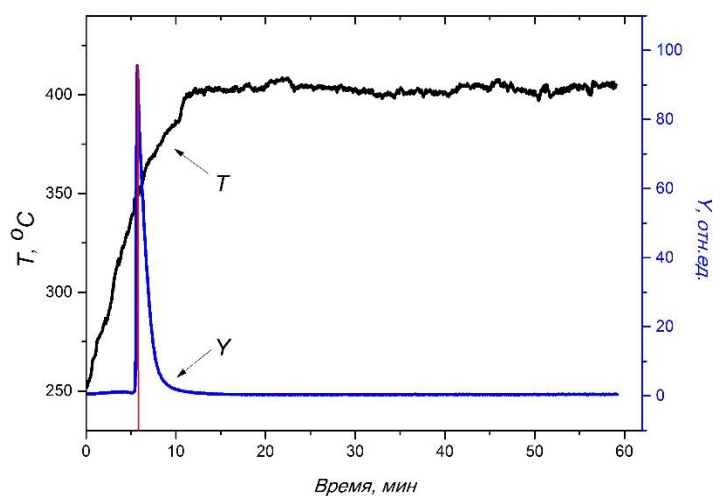
а



б



в



г

Рисунок 3.2 – Спектр РСГВ из титана BT1-0 при времени облучения 45 мин в зависимости от энергии ускоренных электронов: а – 25 кэВ; б – 30 кэВ; в – 35 кэВ; г–40 кэВ.

### 3.3 Массовое содержание водорода в Ti BT1-0 после облучения ускоренными электронами

Содержания водорода определяли с помощью анализатора водорода RHEN602 фирмы LECO показано в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Содержание водорода (в ppm) после облучения электронами

| Время<br>Е,кэВ | 0 мин | 15 мин | 30 мин | 45 мин | 60 мин |
|----------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 25             | 331   | 267.9  | 150    | 78     | 124.6  |
| 30             |       | 160    | 28.3   | 161    | 44.8   |
| 35             |       | 31.6   | 17.1   | 8.4    | 10     |
| 40             |       | 139    | 21.2   | 29     | 74     |

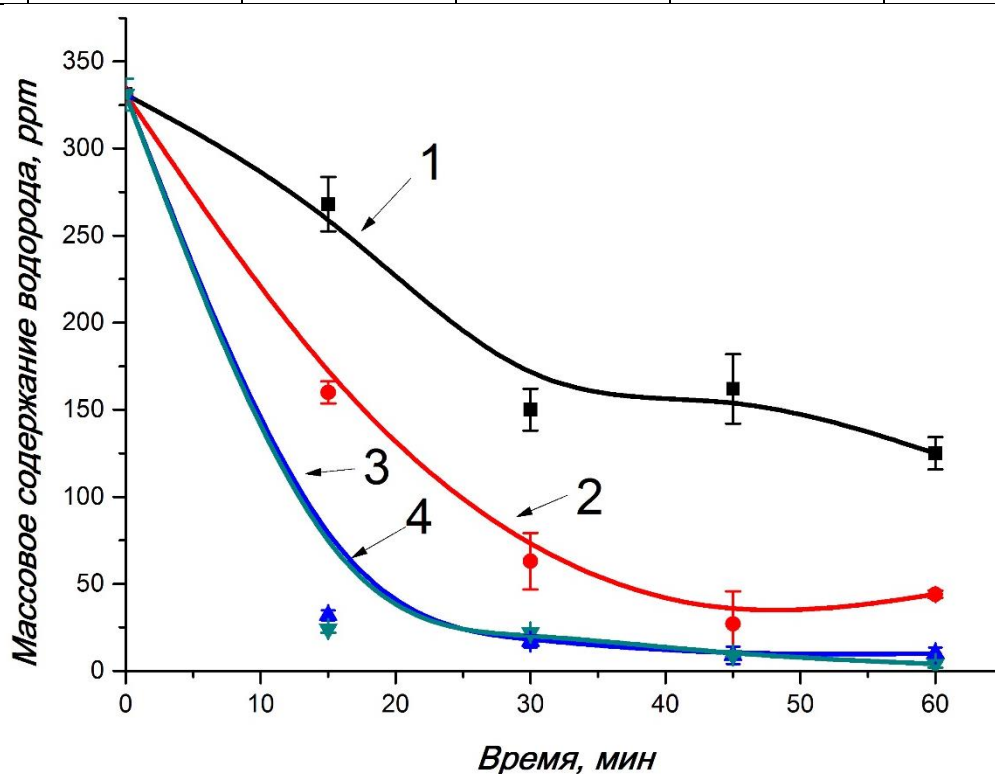


Рисунок 3.4 – Остаточное содержание водорода в титане ВТ1-0 от времени облучения:  
1 – 25 кэВ, 2 – 30 кэВ, 3 – 35 кэВ, 4 – 40 кэВ.

На рисунке 3.4 представлены результаты содержания водорода в титане ВТ1-0 после облучения в зависимости от времени облучения. Из рисунка видно, что при облучении электронами вплоть до 30 мин наблюдается уменьшение содержание водорода в образце, а при времени облучения более 30 мин содержание водорода почти не изменяется.

На рисунке 3.5 представлены зависимости содержания водорода от энергии облучения, при разных временах облучения (для наглядности зависимости были разнесены). Из рисунка 3.5 можно видеть, что по мере увеличения энергии ускоренных электронов уменьшается содержание водорода

в исследуемых образцах. Это явление слабо проявляется на энергиях 25 – 35 кэВ и сильнее на энергиях 35 – 40 кэВ, так что дальнейшее увеличение энергии (выше 40 кэВ) ускоренных электронов не приводит к большему удалению водорода из образцов титана.

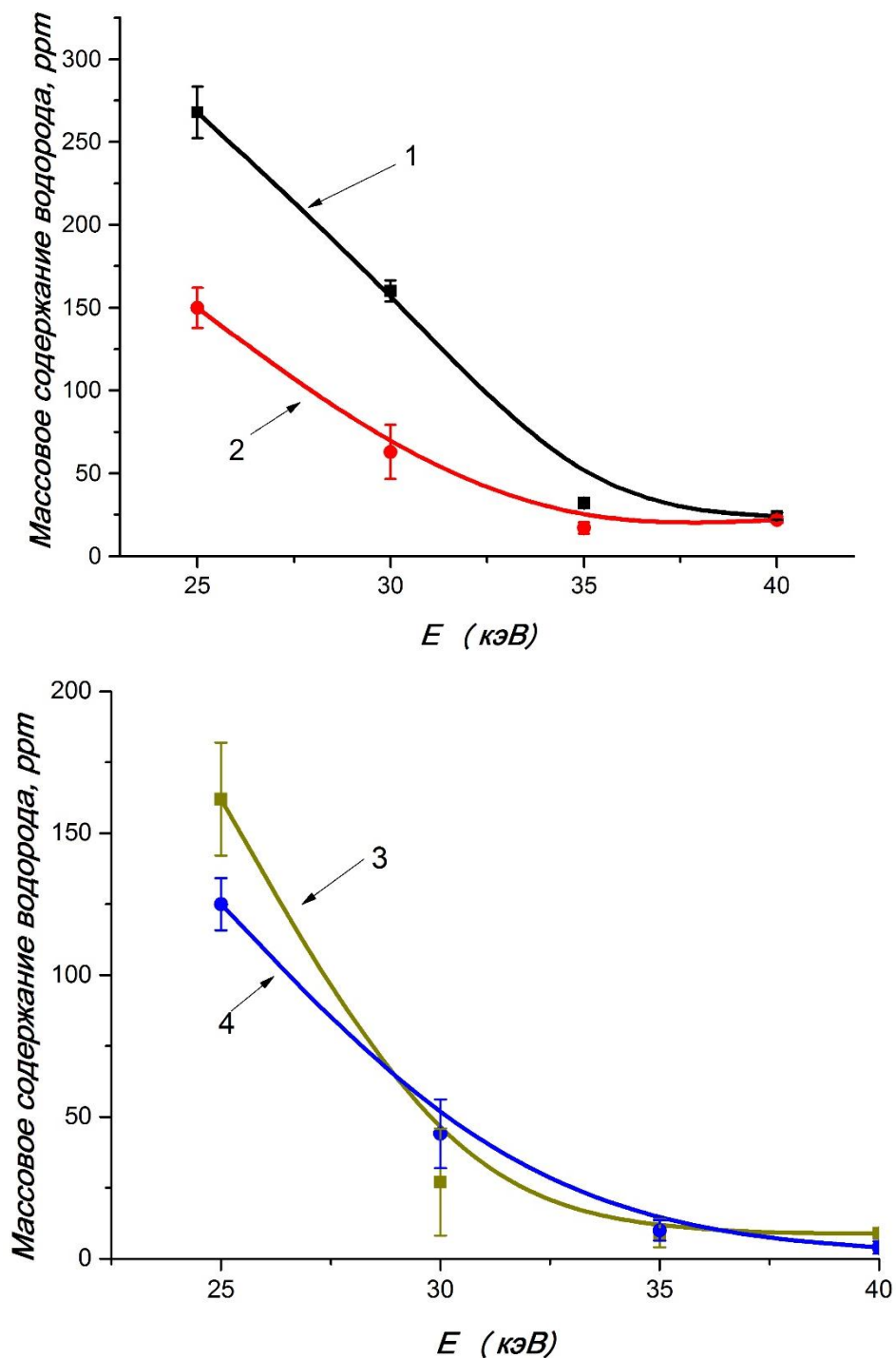


Рисунок 3.5 – Зависимость содержания водорода от энергии облучения: 1 – 15 мин; 2 – 30 мин; 3 – 45 мин; 4 – 60 мин.

### 3.4 Термостимулированное газовыделение

На рисунке 3.6 представлены спектр ТСГВ из титана Ti VT1-0 после разных времён облучения и постоянной энергии ускоренных электронов. И зависимости можно видеть, что с ростом времени облучения содержание водорода уменьшается и чем меньше время облучения ускоренными электронами, тем больше остаточное содержание водорода в образцах. Эти данные согласуется с результатами, представленными, в разделе 3.3, полученными на анализаторе водорода. В работе [38] показано, что в диапазоне температуры 650 – 800°C термодесорбция водорода достигает максимума.

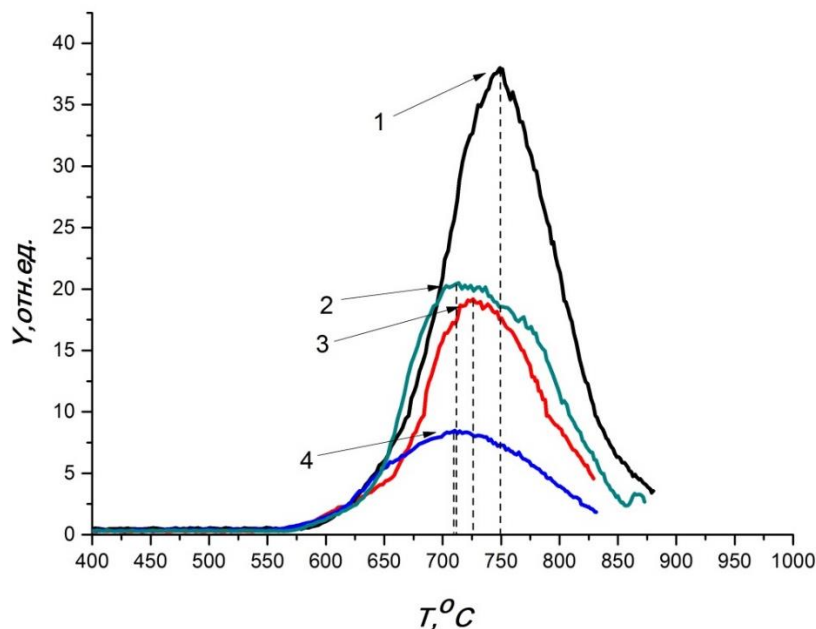


Рисунок 3.6 – Спектр ТДС  $H_2$  из титана VT1-0 при энергии облучения 25 кэВ в зависимости от времени облучения: 1 – 15 мин; 2 – 30 мин; 3 – 45 мин; 4 – 60 мин.

На рисунке 3.7 и 3.8 представлены спектр ТСГВ из титана Ti VT1-0 после облучения электронами разных энергий, но постоянным временем. Можно видеть, что с ростом энергии и постоянным времени облучения содержание водорода уменьшается. Эти данные также согласуются с результатами, полученными в разделе 3.3 на анализаторе водорода.

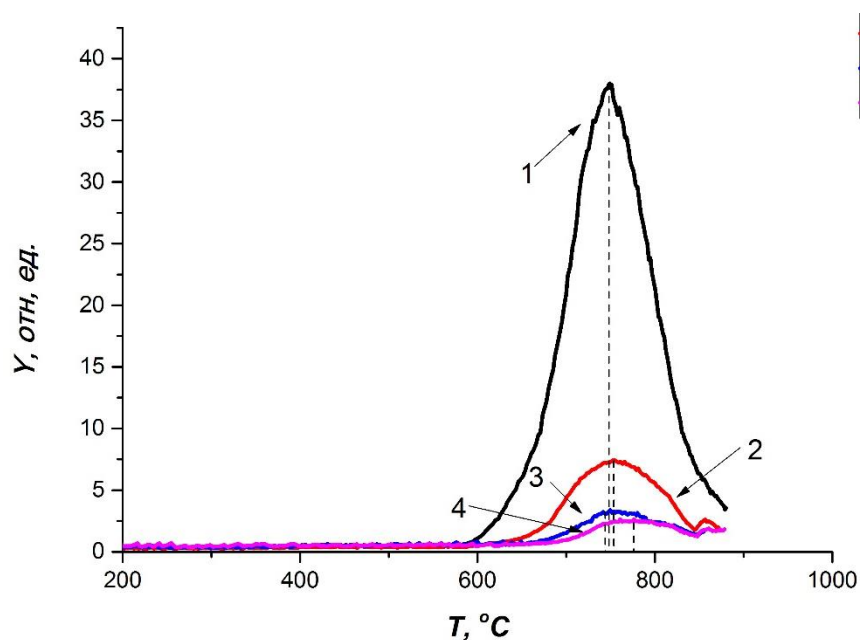


Рисунок 3.7 – Спектр ТСД  $H_2$  из титана VT1-0 при времени облучения 15 мин в зависимости от энергии облучения: 1 – 25 кэВ; 2 – 30 кэВ; 3 – 35 кэВ; 4 – 40 кэВ.

На рисунке 3.8 представлены спектр ТСГВ из титана Ti VT1-0 после разных условий облучения. Также можно видеть, что с ростом времени облучения содержание водорода уменьшается. Кроме того, если сравнить рисунки 3.7 и 3.8, можно наблюдать сдвиг максимальных значений термдесорбционных пиков вправо. Очевидно, такие сдвиги связаны с тем, что после длинного времени облучения, часть водорода с меньшими энергиями связи выходят из образца, а с более высоки перераспределяются. При этом во время облучения образцов наблюдается диффузия водорода, в результате чего водород может захватываться ловушками с более высокими энергиями, и т.о. для его извлечения нужны более высокие энергии.

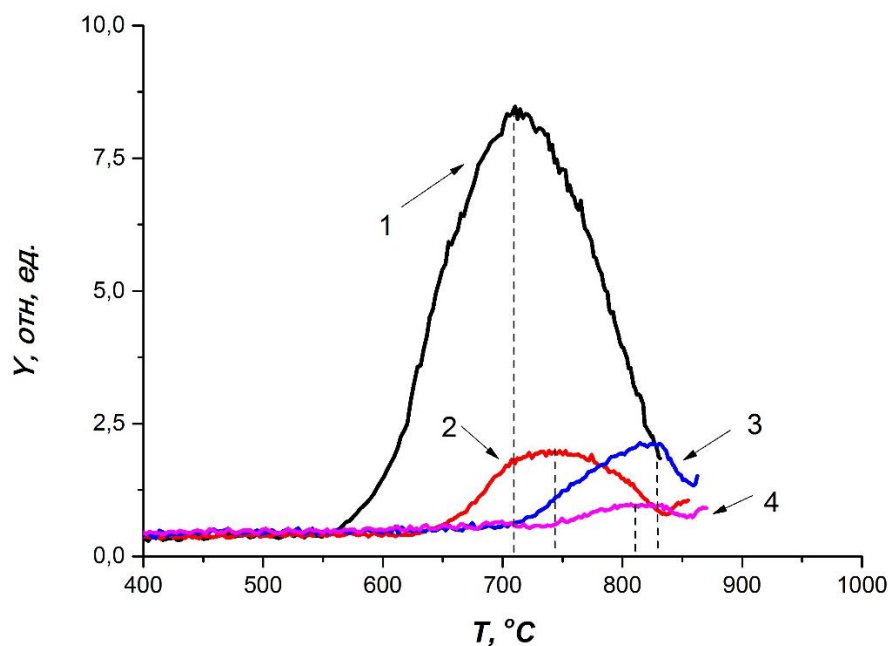


Рисунок 3.8 – Спектр ТСД  $H_2$  из титана ВТ1-0 при времени облучения 45 мин в зависимости от энергии облучения: 1 – 25 кэВ; 2 – 30 кэВ; 3 – 35 кэВ; 4 – 40 кэВ.

### 3.5 Расчет энергии активации десорбции

В качестве примера на рисунке 3.10 представлен спектр выхода водорода, полученный во время облучения ускоренными электронами, на основании этих результатов рассчитаны  $E_d$  водорода по формуле Полани-Вигнера (см. раздел 1.4)

$$E_d = kT_{\max} \left( \ln \frac{v_1 T_{\max}}{\beta} - 3.64 \right)$$

Из рассчитанных данных, представленных в таблице 3.2, следует, что на энергию активации десорбции не влияет ни энергия, ни время облучения.

Таблица 3.2 – Энергии активации десорбции водорода

| $E_e$ , кэВ | $E_d$ , эВ (при облучении ускоренными электронами) | $E_d$ , эВ (при термо-десорбции) |
|-------------|--|----------------------------------|
| исходный    |  | $2.65 \pm 0.11$                  |
| 25          | $1.80 \pm 0.1$                                     | $2.87 \pm 0.07$                  |
| 30          | $1.65 \pm 0.04$                                    | $2.97 \pm 0.03$                  |
| 35          | $1.70 \pm 0.12$                                    | $3.01 \pm 0.12$                  |
| 40          | $1.71 \pm 0.11$                                    | $2.96 \pm 0.10$                  |



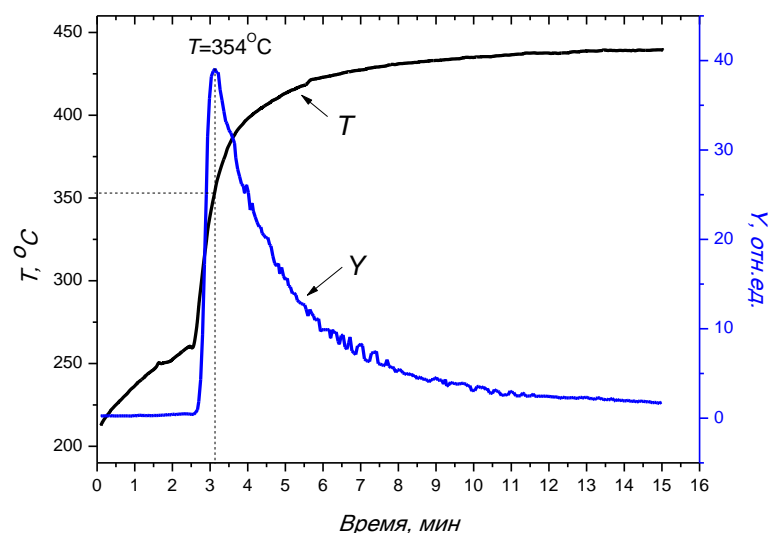


Рисунок 3.10 – Спектр выхода водорода,  $E_e=35\text{кэВ}$ ,  $t_{об} = 30\text{мин}$

Полученные результаты показывают, что при облучении ускоренных электронов  $E_d$  водорода в 1.5–2 раза ниже, чем при термической десорбции. Причина может быть связано с неравновесным характером десорбции водорода в условиях радиационного воздействия [39–40].

С помощью уравнений Канайа-Окаямы (см. раздел 1.7) и Шенланду (см. раздел 1.7) рассчитан максимальный свободный пробег электронов в титане ВТ1-0, представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 Максимальный свободный пробег электронов

| Энергия облучения ускоренных электронов, кэВ | Максимальный свободный пробег электронов, мкм |
|--|---|
| 25   | 3.8   |
| 30   | 5.3   |
| 35   | 7   |
| 40   | 9   |

При облучении «водородная атмосфера», которая находится в твёрдом теле, переходит в неравновесное состояние. И неравновесное состояние внутренней «водородной атмосферы» обеспечивает колебательный обмен, равновесное перераспределение и выход водорода в условиях облучения. Поэтому даже в металлах с быстрой релаксацией в электронной подсистеме присутствие водорода обеспечивает аккумуляцию энергии и способно движению водорода. Электроны, которые находятся в возбужденном состоянии, создают благоприятные условия для передачи энергии первичного

пучков электронов и  $\gamma$ -квантов и другим колебательным степеням свободы Н-содержащих связей.

## **Вывод**

В работе было исследован метод и установка по радиационно-стимулированный выход газов и получены результаты при времени облучения от 15 до 60 мин при энергиях 25-40 кэВ.

На основании проведённых исследований сделаны следующие выводы:

– на десорбцию водорода из титана BT1-0, при облучении ускоренными электронами, влияет как время, так и энергия ускоренных электронов; чем больше время и выше энергия облучения ускоренными электронами, тем меньше остаточное содержание водорода в титана BT1-0.

– энергия активации десорбции водорода при облучении ускоренными электронами для титана BT1-0 в 1.5-2 раза ниже, чем при термодесорбции.

– наиболее оптимальный режим для удаления водорода из титана марки BT1-0 при радиационном облучении –  $E_e = 35$  кэВ,  $t_{об} = 45$  мин,  $j_e = 0.25 \text{ мкА} \cdot \text{мм}^{-2}$

## **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсоснабжение**

### **Введение**

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не только масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса.

Целью данной главы является расчет затрат, необходимых для проведения экспериментов:

1. Насыщение водородом электролитическим методом,
2. Радиационно- и Термостимулированный газ выделении,
3. Определение массового содержания водорода в образцах с помощью анализатором водорода *RHEN-602*.

### **4.1 Планирование управления научно-техническим проектом**

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- Определение структуры работ в рамках научного исследования;
- Определение участников каждой работы;
- Установление продолжительности работ;
- Построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1 –Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы                                       | № раб | Содержание работ  | Должность исполнителя |
|--|-------|---|-----------------------|
| Разработка технического задания                      | 01    | Составление и утверждение технического задания                          | Руководитель темы     |
| Выбор направления исследований                       | 02    | Подбор и изучение материалов по теме                                    | Студент               |
|  | 03    | Проведение патентных исследований                                       | Студент               |
|  | 04    | Выбор направления исследований  | Руководитель, инженер |
|  | 05    | Календарное планирование работ по теме                                  | Студент               |
| Теоретические и экспериментальные исследования       | 06    | Проведение теоретических расчетов и обоснований                         | Студент               |
|  | 07    | Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов                 | Руководитель, Студент |
|  | 08    | Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями | Студент               |
|  | 09    | <i>Заполняется дипломником самостоятельно</i>                           | Студент               |
| Обобщение и оценка результатов                       | 10    | Оценка эффективности полученных результатов                             | Руководитель, Студент |
|  | 11    | Определение целесообразности проведения ОКР                             | Руководитель, Студент |
| <i>Проведение ОКР</i>                                |       |   | Руководитель, Студент |
| Разработка технической документации и проектирование | 12    | Разработка блок-схемы, принципиальной схемы                             | Руководитель, Студент |
|  | 13    | Выбор и расчет конструкции  | Руководитель, Студент |
|  | 14    | Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия   | Руководитель, Студент |

|  |    |  |                       |
|--|----|--|-----------------------|
| Изготовление и испытание макета (опытного образца)       | 15 | Конструирование и изготовление макета (опытного образца)                     | Студент               |
|  | 16 | Лабораторные испытания макета  | Студент               |
| Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР) | 17 | Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации) | Руководитель, Студент |
|  | 18 | Оформление патента   | Руководитель, Студент |
|  | 19 | Размещение рекламы   | Руководитель,         |

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Для планирования работы была выбрана диаграмма Ганта, которая представляет собой тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 4.3 с разбивкой по месяцам за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

## 4.2 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования(НТИ) должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- Материальные затраты НТИ;
- Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- Основная заработная плата исполнителей темы;
- Дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- Накладные расходы.

### 4.2.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода

В материальные затраты, помимо выше указанных, включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в научной организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_{\text{м}} = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{\text{расх}i} ,$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$\Pi_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Величина коэффициента ( $k_T$ ), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

| Наименование                                    | Марка, размер | Кол-во | Цена за единицу,<br>руб. | Сумма, руб. |
|---|---------------|--------|--------------------------|-------------|
| Титан ВТ1-0                                     | 10*7*1мм      | 21     | 30                       | 630         |
| Спирт   | 500мл         | 1      | 200                      | 200         |
| наждачная<br>бумага                             | Радиус 15см   | 20     | 60                       | 1200        |
| Всего за материалы                              |               |        | 2030                     |             |
| Транспортно-заготовительные расходы<br>(15-25%) |               |        | 800                      |             |
| Итого по статье $C_m$                           |               |        | 2830                     |             |

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов.

#### **4.2.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ**

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования<sup>1</sup>. Установка насыщения водорода в титане в водородной плазме; 2. Установка термостимулированный газ выделения; 3. Анализатор водорода *RHEN-602*, необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Расчет затрат по данной статье заносится в табл. 4.4.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации, но используемого для каждого исполнения конкретной темы, сводятся в табл. 4.4.





[illegible]



[illegible]

### 4.2.3 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данной работе к спецоборудованию необходимому для проведения экспериментальной работы относится для исследования термо- и радиационно- стимулированного газовыделения, стоимость которого составляет 2000000 руб, назначенный срок службы – 10 лет.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитывается по формуле:

$$C_{аморт} = \frac{C_{об}}{T'}$$

где  $C_{об}$  - стоимость оборудования (руб);  $T$  - срок службы (дней).

$$C_{аморт} = \frac{2000000}{3650} = 547.95 \text{ руб / дн},$$

Оборудование использовалось в течение 76 дней, поэтому затраты на оборудование составляют:

$$C_{аморт} = 547.95 * 23 = 41643.83 \text{ руб / дн}.$$

### 4.2.4 Основная заработная плата

Статья включает основную заработную плату установки, работники непосредственно занято выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату. Основная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата;

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$З_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}$$

где  $З_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

При отпуске в 24 раб.дня  $M=11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

При отпуске в 48 раб.дней  $M=10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_m = З_{тс} \cdot (1 + k_{пp} + k_d) \cdot k_p$$

где  $З_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 4.5.

#### 4.2.5 Дополнительная заработная плата

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн}$$

где  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

#### **4.2.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)**

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30.2%.

#### **4.2.7 Накладные расходы**

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}},$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

#### **4.2.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта**

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в табл. 4.5.

Таблица 4.5 Расчет бюджета затрат НТИ

| Наименование статьи  | Сумма, руб.  |         |
|--|--------------|---------|
|  | Руководитель | Студент |
| 1. Материальные затраты НТИ  | 2320         |         |
| 2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ | 41643,84     |         |
| 3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы                    | 81314,70     | 9709,30 |
| 4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы              | 12197,21     | 970,93  |
| 5. Отчисления во внебюджетные фонды  | 27089,96     |         |
| 6. Затраты на научные и производственные командировки                        | 0            |         |
| 7. Контрагентные расходы   | 0            |         |
| 8. Накладные расходы   | 16670,74     |         |
| Бюджет затрат НТИ  | 191916,68    |         |

## **5. Социальная ответственность**

### **Введение**

Исследование влияния энергии и времени облучения ускоренными электронами на выход водорода из титана Вt1-0 предполагает проведение работ на различных установках. Проводится насыщение образцов титана в установке для насыщения водородом электролитическим методом; Проводятся исследования выхода водорода из образцов титана методом радиационно- и термо-стимулированной десорбции в зависимости от времени облучения и энергии ускоренных электронов.

Основой работы является изучение влияния энергии и времени облучения ускоренными электронами на выход водорода из титана Вt1-0. Таким образом, особенно важным при проведении данного исследования является исследование установки для исследования процесса термо- и радиационно-стимулированного выхода водорода и анализатора водорода *RHEN-602*. Анализ и обработка результатов, построение диаграмм происходят с помощью ПЭВМ.

### **5.1 Производственная безопасность**

Установка для изучения состоит из высоковакуумной камеры и насосов, устройств нагрева и облучения, образцов электронами, масс-спектрометра и системы регистрации параметров процесса выделения растворенных и адсорбированных атомов и молекул. Высоковакуумная система имеет три ступени откачки для получения высокого вакуума: форвакуумный насос 9 (isp-250 с), тмн 4 (shimadzu EI-S04M) и гибридный тмн 5 (атн 300). При проведении работ на данной установке возможно воздействие таких вредных факторов таких, как:

1. Отклонение показателей микроклимата на рабочем месте;
2. Электромагнитное излучение;
3. Шум.

Также возможно воздействие следующих опасных производственных



факторов:

1. Электрическое напряжение;
2. Пожарная и взрывная природа.

### 5.1.1 Отклонение показателей микроклимата на рабочем месте

Микроклимат производственных помещений определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха.

Отклонения данных параметров от нормы оказывает вредное влияние на человека, при этом обычно возникают ухудшение самочувствия работника, снижение эффективности работы и различные заболевания.

Неблагоприятные условия могут вызывать перенапряжение механизма терморегуляции, что ведет к перегреву или переохлаждению организма. Высокая температура приводит к быстрой утомляемости работника, может привести к перегреву организма, тепловому удару. А низкая температура может вызвать местное или общее охлаждение организма, и привести к простудному заболеванию либо обморожению.

Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи. Низкая влажность вызывает неприятные ощущения в виде сухости слизистых оболочек дыхательных путей работающего.

Для удобства работы в помещении необходимо нормирование параметров микроклимата (табл. 5.1) и применение защитных мероприятий защиты от вредного влияния отклонения параметров микроклимата.

Таблица 5.1 Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96).

| Период года | Категория работ по уровням энергозатрат, Вт | Температура воздуха, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, |
|-------------|---|-------------------------|------------------------------------|----------------------------|
|-------------|---|-------------------------|------------------------------------|----------------------------|

|          |              |       |       |     |
|----------|--------------|-------|-------|-----|
|          |              |       |       | м/с |
| Холодный | Iб (140-174) | 21-23 | 60-40 | 0,2 |
| Теплый   | Iб (140-174) | 22-24 | 60-40 | 0,2 |

### 5.1.2 Электромагнитное излучение

Научно-исследовательская работа выполнялась с помощью персональных компьютеров (ПЭВМ). При этом основным вредным фактором для инженера-исследователя является электромагнитное излучение, которое влияет на костные ткани, ухудшает зрение, повышает утомляемость, а также может вызвать ослабление памяти и возникновение онкологических заболеваний.

Таблица 5.2 Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах.

| Наименование параметров                |                                    | ВДУ     |
|--|------------------------------------|---------|
| Напряженность электрического поля      | в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц    | 25 В/м  |
|  | в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц | 2,5 В/м |
| Плотность магнитного потока            | в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц    | 250 нТл |
|  | в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц | 25 нТл  |
| Напряженность электростатического поля |                                    | 15 кВ/м |

Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 и представлены в табл. 5.2.

### 5.1.3 Шум

Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях – к глухоте. Шумовое загрязнение среды на рабочем месте неблагоприятно воздействует на работающих: снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В результате снижается

производительность труда и качество выполняемой работы.

Нормирование шума призвано предотвратить нарушение слуха и снижение работоспособности и производительности труда работающих. Для разных видов шумов применяются различные способы нормирования.

Для постоянных шумов нормируются уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Для непостоянных шумов нормируется так же эквивалентный уровень звука. Допустимые уровни звукового давления для рабочих мест служебных помещений и для жилых и общественных зданий и их территорий различны.

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 при разработке технологических процессов, проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, производственных зданий и сооружений, а также при организации рабочих мест следует принимать все необходимые меры по снижению шума, воздействующего на человека, до значений, не превышающих допустимые.

Методы и средства коллективной защиты в зависимости от способа реализации подразделяются на строительно-акустические, архитектурно-планировочные и организационно-технические и включают в себя:

1. изменение направленности излучения шума;
2. рациональную планировку предприятий и производственных помещений;
3. акустическую обработку помещений;
4. применение звукоизоляции.

Наиболее эффективны средства индивидуальной защиты (СИЗ), как правило, в области высоких частот. СИЗ включают в себя против шумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы.

#### **5.1.4 Электробезопасность**

Основными причинами воздействия тока на человека являются:

1. Случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям;
2. Появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции или ошибочных действий персонала;
3. Шаговое напряжение на поверхности земли в результате замыкания провода на землю;
4. Появление напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых работают люди, вследствие ошибочного включения установки;
5. Освобождение другого человека, находящегося под напряжением;
6. Воздействие атмосферного электричества, грозových разрядов.

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6-16мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Согласно ГОСТ 12.1.019. ССБТ, электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Согласно ПУЭ 7.4 «Правила устройства электроустановок» помещение, в котором находится установка, предназначенная для нанесения оксидов и оксинитридов титана на стальные подложки, относится к помещениям без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность. К таким условиям относятся: сырость (влажность более 75 %), токопроводящей пыли, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.); высокие

температуры (выше 35 °С); возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей технологическим аппаратам, механизмам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой. В лаборатории находятся электрические установки с классами напряжения до 1 кВ, в которых, согласно ГОСТ12.1.038-82 ССБТ, предельно допустимые безопасные значения тока, напряжения и сопротивления не должны превышать значений 0,1 мА, 36В и 4 Ом соответственно.

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

1. содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
2. своевременно проводить техническое обслуживание;
3. соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;
4. проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

1. изоляция токоведущих частей;
2. малое напряжение в электрических цепях;
3. защитное заземление, зануление, защитное отключение;
4. применение разделяющих трансформаторов;
5. использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;
6. средства индивидуальной защиты и предохранительные приспособления: диэлектрические перчатки, галоши, изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, диэлектрические резиновые ковры, указатели напряжения.

### 5.1.5 Пожар взрывоопасность

Согласно НПБ 105-03 используемое помещение относится к категории пожароопасной В4, т.е. в которых находятся горючие и трудно горючие жидкости, вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), но удельная пожарная нагрузка на участке находится в интервале  $1-180 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ . В лаборатории разработаны инструкции о мерах пожарной безопасности для каждого взрывопожароопасного и пожароопасного участка (мастерской, цеха и т. п.) в соответствии с Федеральным законом от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

Согласно НПБ 105-95 и СНиП 21-01-97 работники допускаются к работе только после прохождения инструктажа о мерах пожарной безопасности, во всех помещениях вывешены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной охраны и таблички с направлением пути эвакуации и план эвакуации.

Согласно НПБ 105-95 и СНиП 21-01-97 в здании, где ведутся работы, предусмотрены инженерно-технические решения, которые обеспечивают в случае пожара эвакуацию людей (аварийные выходы), подачу средств пожаротушения к очагу, есть сигнализация и работает оповещение о пожаре.

Пожарные краны, огнетушители и другая пожарная техника для защиты объектов соответствует (ГОСТ 12.1.004-91 с измен. 21.10.1993 г).

Из огнетушителей разных видов наиболее широко используются углекислотные, порошковые и воздушно-пенные. Огнетушители воздушно-пенные используются при тушении пожаров классов А и В (дерево, краски и ГСМ) не допускается применять для тушения электроустановок под напряжением, а также щелочных металлов; эксплуатируются при температуре от +5 до +50°C.

Порошковые огнетушители используются в качестве первичного средства тушения пожаров класса А (твердых веществ), В (жидких веществ), С (газообразных веществ) и электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В; огнетушители не пригодны для тушения загораний щелочных и

щелочноземельных металлов и других материалов, горение которых может происходить без доступа воздуха.

## **5.2 Организационные мероприятия обеспечения безопасности**

Для обеспечения безопасности перед началом работы необходимо правильно надеть спецодежду, подготовить для работы необходимый инструмент и приспособления, приготовить рабочий стол. Также необходимо проверить отсутствие внешних повреждений электрооборудования, наличие и исправность контрольных, измерительных и сигнальных приборов, компьютера, тумблеров, переключателей и т.п. При выявлении неисправностей необходимо доложить руководителю лаборатории.

Запрещается приступать к работе, если выявлены неисправности любого используемого оборудования, если истек срок очередного освидетельствования баллона, истек срок проверки манометра, если персонал не прошел в установленном порядке обучение и проверку знаний безопасности труда.

Работа с установкой должна производиться в чистом помещении, свободном от пыли, паров, кислот и щелочей, агрессивных газов и других вредных примесей, вызывающий коррозию. Недопустимо наличие открытого огня около прибора.

После окончания работы с установкой необходимо:

1. Убедиться, что все клапаны контроллера закрыты;
2. Выйти из программы, отключить питание компьютера;
3. Отключить установку и насос от электросети.

## **5.3 Охрана окружающей среды**

В данной работе отходами являются металлические порошки, полученные вследствие чистки камеры и других компонентов установки.

Порошки, главным образом, состоят из стали, титана и оксинитридов титана. Для утилизации этих отходов сначала следует их разделить, для этого можно использовать магнит. После разделения отходов на 2 подгруппы: сталь и оксинитриды титана, нужно их перевести на специальные места на переработку.

## **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Рассмотрим две наиболее типичных чрезвычайных ситуации, которые могут произойти на предприятии.

Первый случай: остановка производства в результате сильных морозов.

Меры по предупреждению ЧС:

1. Повышение устойчивости системы электроснабжения. В первую очередь целесообразно заменить воздушные линии электропередач на кабельные (подземные) сети, использовать резервные сети для запитки потребителей, предусмотреть автономные резервные источники электропитания объекта (передвижные электрогенераторы).

2. Обеспечение устойчивости теплоснабжения за счет запасных автономных источников теплоснабжения, кольцевания системы, заглубления теплотрасс.

3. Обеспечение устойчивости систем водоснабжения (устройство дублирования вод питания, кольцевание системы, заглубление водопроводов, обустройство резервных емкостей и водохранилищ, очистка воды от вредных веществ и т.п.).

4. Обеспечение устойчивости системы водоотведения. Повышение устойчивости системы канализации достигается созданием резервной сети труб, по которым может отводиться загрязненная вода при аварии основной сети. Должна быть разработана схема аварийного выпуска сточных вод непосредственно в водоемы. Насосы, используемые для перекачки загрязненной воды, комплектуются надежными источниками электропитания.



Второй случай: диверсия.

Для обеспечения безопасности работника, предотвращения хищений и проникновении посторонних лиц на предприятие следует использовать ряд мер безопасности:

1. Организовать контрольно-пропускной пункт.
2. Установить системы видеонаблюдения в производственных цехах, а также на всех входах и выходах из здания.
3. Установить оповещающие системы безопасности при несанкционированном проникновении на предприятие в нерабочее время.

### **5.5 Перечень законодательного документа**

К работе на установке для исследования термо- и радиационно-стимулированного газовыделения допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинские противопоказания, прошедшие обучение безопасности труда и инструктаж на рабочем месте.

К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний норма и правил работы с электроустановками, правил безопасности работы с газовыми баллонами, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы на установке для исследования термо- и радиационно- стимулированного газовыделения, имеющие не менее II группы по электробезопасности и получившие допуск к работе с газовыми баллонами.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с газовыми баллонами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в Журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым

проводится инструктаж.

По данной теме рассматриваются законодательный и нормативные документы:

1. инструкция № 2-25 по охране труда при выполнении работ на установке Gas Reaction Controller;
2. инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;
3. инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением.

Документы по воздействию ПЭВМ:

1. инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ;
2. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы;
3. ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности;
4. ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности;

Микроклимат:

1. ГОСТ 12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны;
2. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

Шум:

1. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.
2. СНиП П-12-77. Защита от шума.

## **Вывод**

В ходе рассмотрения безопасности и гигиены труда при осуществлении работ по нанесению покрытий на установке для исследования термо- и

радиационно- стимулированного газовыделения, были выявлены вредные и опасные факторы рабочей зоны, мероприятия и средства защиты, рассмотрены чрезвычайные ситуации и поведение в них, представлены порядки работы на данной установке. Для обеспечения безопасности жизнедеятельности обязательно выполнить работу по правилам.

## Заключение

В процессе выполнения ВКР для достижения цели в работе были определены и решены следующие задачи:

1. приведены литературный обзор по теме ВКР.
2. освоены установка для насыщения образцов водородом электролитическим методом, установка термо- и радиационно-стимулированного газовыделения и анализатор водорода RHEN-602.
3. получены спектры термо- и радиационно-стимулированной десорбции водорода из образцов титана BT1-0 насыщенных водородом в зависимости от разных энергий ускоренных электронов (25 - 40 кэВ) и разных времени облучения(15–60мин); определены содержание водорода в образцах после облучения; рассчитаны энергии активации десорбции при радио- и термодесорбции; определена глубина проникновения ускоренных электронов в зависимости от энергии облучения.

На основании проведённых исследований получены следующие выводы

– на десорбцию водорода из титана BT1-0, при облучении ускоренными электронами, влияет как время, так и энергия ускоренных электронов; чем больше время и выше энергия облучения ускоренными электронами, тем меньше остаточное содержание водорода в титана BT1-0.

– энергия активации десорбции водорода при облучении ускоренными электронами для титана BT1-0 в 1.5-2 раза ниже, чем при термодесорбции.

– наиболее оптимальный режим для удаления водорода из титана марки BT1-0 при радиационном облучении –  $E_e = 35$  кэВ,  $t_{об} = 45$  мин,  $j_e = 0.25 \text{ мкА} \cdot \text{мм}^{-2}$ .

## Список литературы

1. Тюрин Ю. И., Чернов И.П. Радиационно-стимулированный выход водорода из металлов. //Томск: ТПУ. – 2008. – С. 252.
2. Писарев А. А., Черников В. Н. Взаимодействие водорода с металлами. – 1987. –С. 400.
3. Товбин Ю.К., Вотяков Е.В. Оценка влияния растворенного водорода на механические свойства металлов. // Физика твердого тела. - 2010. - Т.42, №7. - С. 1158-1160.
4. Горячев Б. В. и др. Применение теории многократного рассеяния к процессам взаимодействия электронов с водородной подсистемой металлов //Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – №. 2. С. 93–96.
5. Белушкин А. В., Натканец И., Сумин В. В., Колебательного спектра водорода в твердых растворах титан кислород методом неупругого рассеяния нейтронов// Физика твердого тела. - 1985. - Т.27, №7. - С. 2751-2754.
6. Huang Gang, Cao Xiaohua, Long Xingguai. Physical and chemical properties of titanium-hydrogen system. // Materials Review. – 2006. – Т. 10. – С. 34.
7. Лучинский, Г.П. Химия титана. – М.: Химия, 1971. – С. 471.
8. Girolodi J. P., Vizcaino P., Banchik A. D. Terminal solid solubility of hydrogen in titanium. – 2003.
9. Агеев В. Н., Беркман И.Н., Бурмистров О.П., Взаимодействие водорода с металлами. – 1987.С. 101.
10. Чернов И. П., Черданцев Ю. П., Тюрин Ю. И. Методы исследования систем металл-водород //Томск: Изд-во ТПУ. – 2008. – Т. 270. – С. 286.
11. Никитенков Н.Н., Основы анализа поверхности твердых тел методами атомной физики/ Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 203.
12. Шаповалов В.И., Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов// М.: Металлургия, –1982. –С. 232.

13. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М., Введение в физику поверхности. // – М: Наука, 2006. – С. 490.
14. Никитенков Н. Н., Хоружий В. Д. Исследование выхода изотопов водорода методами термогазовыделения //Томск: ТПУ. – 2007.
15. Баумбах Х. М., Тюрин Ю. И., Чернов, Ю, П., Неравновесные системы металл-водород, титан, нержавеющая сталь. //Томск: Изд-во ТГУ, –2001. –С. 137-143.
16. Lee Jai-Young//Surf. And Catal. Technol., 2014. Vol. 28, No.3-4 P.301-309
17. Donovan J.A.//Met. Trans.2009. Vol. 7A. P.1677-1683.
18. Кайбышев О. А., Валиев Р. З., Границы зерен и свойства металлов. – 2007. – С. 214.
19. Stuszynska M.//Ser. Mal. 2008. Vol.19, No.12. P 1409-1412.
20. Максимов Е. Г., Панкратов О. А. Водород в металлах //Успехи физических наук. – 1975. – Т. 116. – №. 7. – С. 385-412.
21. Кожушнер М. А., Кустарев В. Г., Шуб Б. Р. ДАН СССР. 1977 //Т. – Т. 237. – С. 871-876.
22. Галактионова Н.А. Водород в металлах. М. Металлургиздат / М., 1967.
23. Тюрин Ю. И., Чернов И. П., Смекалина Т. В. Механизмы радиационно-стимулированной диффузии и выхода водорода из металлов //Физ. ХОМ. – 1998. – №. 3. – С. 11–16.
24. Тагиров Р. Б. ДАН СССР. 1985 //М. – Т. 2. – С. 401-405.
25. Miki T.//Nucl. Phys. Mat. 1981. Vol.101. P.350-361.
26. Caysey R.A., Steck L.M/J.Nucl. Phys. Mater. 1984. Vol.122- 123. P.1518-1524.
27. Rork G. D., Consoliver R.E., Surf. Sci., 10, 291
28. Redhead P.A., Nuovo Chim. Suppl., 5, 586 (2007).
29. Д. Вудраф, Т. Делчар, Современные методы исследования поверхности: Пер. с англ. – М., Мир,2009. –С. 564.

30. Тюрин Ю.И., Чернов И.П. Аккумулирующие свойства материалов в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат. 2008.
31. Иоффе А.Ф., Взаимодействие электронного пучка с образцом. – Санкт-Петербург. – 2010.
32. Коновалов А. В.. Теория сварочных процессов //Издательство МГТУ им. НЭ Баумана, 2007г. – С. 102.
33. Якименко Л.М., Модылевская И.Д., Ткачек З.А. Электролиз воды.// – М.: Химия, 2012.
34. Определение общего и поверхностного водорода методом плавления в атмосфере инертного газа: [Электронный ресурс] // LECO Corporation – представительство в России. 2012. – Режим доступа: <http://ru.leco-europe.com/product/rhen602/>.
35. Коротких А. Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие //Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2011.
36. Хашхаш, Адель Мохаммед Али, Исследование поведения водорода в нержавеющей стали при температурном и радиационном воздействии: дис. – 2010. – С. 8.
37. Mingwang Ma, Lei Wang, Binghua Tang, Ping Lyu, Wei Xiang, Yuan Wang, Xiaohua Tan. Kinetics of hydrogen desorption from titanium hydride under isothermal conditions //International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Т. 43. – №. 3. – С. 1577-1586.
38. Кудияров В.Н., Лидер А.М., Пушилина Н.С., Тимченко Н.А., Особенности накопления и распределения водорода при насыщении титанового сплава ВТ1-0 электролитическим методом и из газовой среды //Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. – №. 9. – С. 117-121.
39. Тюрин Ю. И., Никитенков Н. Н., Ларионов В. В. Диффузия и выход водорода из металлов под действием ионизирующего излучения //Журнал физической химии. – 2014. – Т. 85. – №. 6. – С. 1148-1154.

40. Тюрин Ю.И. Неравновесное высвобождение атомарного водорода из металлов при облучении. – М.: Водородная энергия, 2002. – С. 829.